
CURSO DE INSPECTORES DE SOLDADURA - IAS
TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA
TERMO SOLDEX S.A.

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA

ING. SERGIO G. LAUFGANG

TERMO SOLDEX S.A

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA – PRUEBA HIDRÁULICA DE GASODUCTOS

Bs.As O11 4 624 2345 NQN 0299 447 2345

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA

Sección I. Tecnología

Sección II. Efectos Indeseables del Ciclo Térmico de Soldadura

Sección III. Soluciones
Resumen de las razones para realizar Tratamiento Térmico de Soldadura

Sección IV. Precalentamiento

Sección V. Tratamientos Térmicos post soldadura

SECCIÓN I. TECNOLOGÍA

1. GENERAL

El interrogante que surge cuando se estudia este tema es preguntarse que tiene de particular o diferente el Tratamiento Térmico de Soldadura con respecto a los Tratamientos Térmicos de elementos de máquinas.

.- El Tratamiento Térmico de Soldadura se aplica generalmente a equipos de gran tamaño y difíciles de movilizar (Ej. Recipientes) En otros casos la parte a tratar esta fija y es imposible separarla físicamente del conjunto (Ej. Cañerías ya montadas).

.- Cuando es posible, se lleva a cabo calefaccionando integralmente todo el equipo, la forma más sencilla es la utilización de un horno, cuando el tamaño del equipo y su ubicación lo permite.

.- Usualmente se presenta el problema de que no hay hornos en donde quepa el equipo o que el horno se encuentra alejado del lugar de fabricación y la movilización del equipo es costosa, o inconveniente. En estos casos el Tratamiento Térmico de Soldadura se realiza "in situ" al equipo entero como ocurre con los tanques esféricos de gas licuado a los que se aísla completamente y se los calienta desde el interior y a veces localizadamente en los cordones de soldadura

.- Desde el punto de vista del material también hay algunas diferencias importantes

.- Los aceros soldables tienen un contenido de Carbono limitado a valores de alrededor de 0,2 % con el objeto de limitar la Templabilidad (que implica dureza) de los mismos ya que esta última es inversamente proporcional a la Soldabilidad.

.- Los Aceros Soldables se especifican generalmente con orientación hacia las propiedades mecánicas (Normas ASTM) con una considerable amplitud en la composición Química. Por ejemplo los casos de ASTM 514 y 517 son especificaciones para chapas de alta resistencia y para recipientes a presión respectivamente. Cada una contiene varias composiciones que pueden proveer las Propiedades Mecánicas requeridas.

.- En cambio los Aceros de construcción de máquinas se especifican con límites estrictos de Composición Química (Especificaciones SAE) dejando las propiedades mecánicas libradas a los diferentes Tratamientos Térmicos que el fabricante de la pieza estipule durante el proceso de fabricación. La Composición Química es por lejos el criterio más utilizado para la designación de los Aceros seguido por las Especificaciones basadas en las Propiedades Mecánicas.

.- La mayoría de los Tratamientos Térmicos de Soldadura son Subcríticos y no de Recristalizacion Alotrópica (Austenización) como ocurre en los aceros de construcción de elementos de máquinas (ejes, engranajes, etc.)

RESUMEN DE LOS DISTINTOS METODOS DE TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA

Tratamiento Térmico de Soldadura	Integral	1) Horno Estacionario	
		2) Horno Portátil	
		3) Calefaccionado interno con quemadores de alta velocidad	
	Localizado	1) Resistencias Eléctricas	• Calefactores Flexibles • Método de la Mampara
		2) Inducción	
		3) Radiación con lámparas de cuarzo	
		4) Radiación por calefactores a gas tipo infrarrojo	
		5) Exotérmico	
		6) Llama	

2. TRATAMIENTO TERMICO INTEGRAL

2.1) TRATAMIENTO TÉRMICO EN HORNO

Hay dos (2) tipos de horno:

.- Horno Fijo o Estacionario. Como su nombre lo indica son hornos fijos, construidos dentro de una planta y los equipos deben ser llevados al mismo e introducidos generalmente con puentes grúas. El piso de estos hornos suele ser móvil para facilitar la carga y descarga. En el caso de hornos antiguos la aislación térmica esta realizada con ladrillos refractarios. En los modernos la aislación es de fibra cerámica, que posee una inercia térmica menor disminuyendo los tiempos de tratamiento y el gasto de combustible.

.- Los hornos portátiles, o modulares son hornos desarmables que se pueden llevar al lugar donde se esta fabricando el o los equipos. Se llevan los módulos en vehículos y se arman a medida del tamaño de los equipos a tratar. Tienen la ventaja de poderse modificar las dimensiones agregando o quitando módulos.
La principal desventaja es su alto costo de amortización. Están realizados con paneles revestidos exteriormente en chapa galvanizada e interiormente aislados con fibra cerámica. Al igual que los hornos fijos la medición de la Temperatura suele hacerse con Termocuplas de ambiente, en este caso se debe estar seguro de la uniformidad de temperatura en todos los puntos del horno. Es importante que los quemadores no incidan sobre el equipo a tratar ya que pueden producirse sobrecalentamientos localizados que aumentan el tamaño de grano y producen estructuras frágiles.

2.2 POR CALEFACCIONADO INTERNO

Es el caso típico de Tratamiento Térmico de Esferas de Gas licuado aunque puede realizarse con mayor o menor dificultad en otros tipos de configuraciones.
Lo original de este método consiste en utilizar el mismo equipo como horno. Esto se logra revistiendo el equipo con dos capas de aislacion. La capa primera debe ser refractaria, se usa fibra cerámica ya que la misma debe resistir las altas temperaturas de la piel caliente del equipo (≈ 600 ºC). La segunda capa puede ser un material aislante, menos refractario y menos costoso, por ejemplo Lana Mineral. No debe usarse Lana de vidrio por que tiene un aglomerante polimérico que se quema aún estando sobre la capa de fibra cerámica ya que esta suele tener imperfecciones como por ejemplo en las uniones de conexiones a la esfera (escaleras, barandas, etc.). Los espesores de la aislacion se calculan haciendo un Balance Térmico.

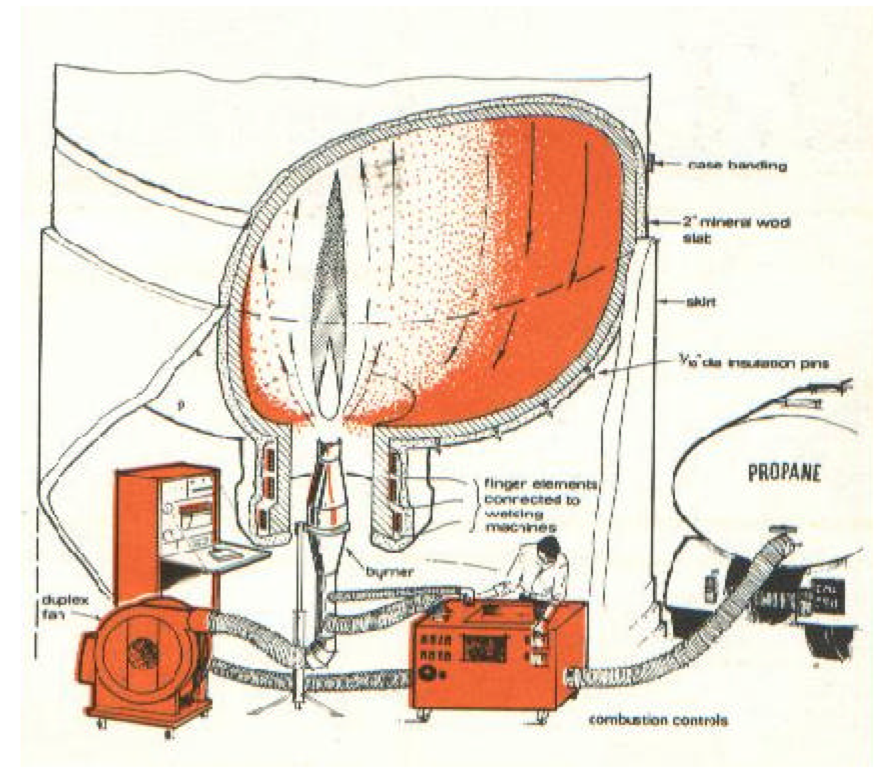


Fig. 1 Esquema de un TTPS Integral de un tanque vertical con Quemadores de alta velocidad a gas Propano.

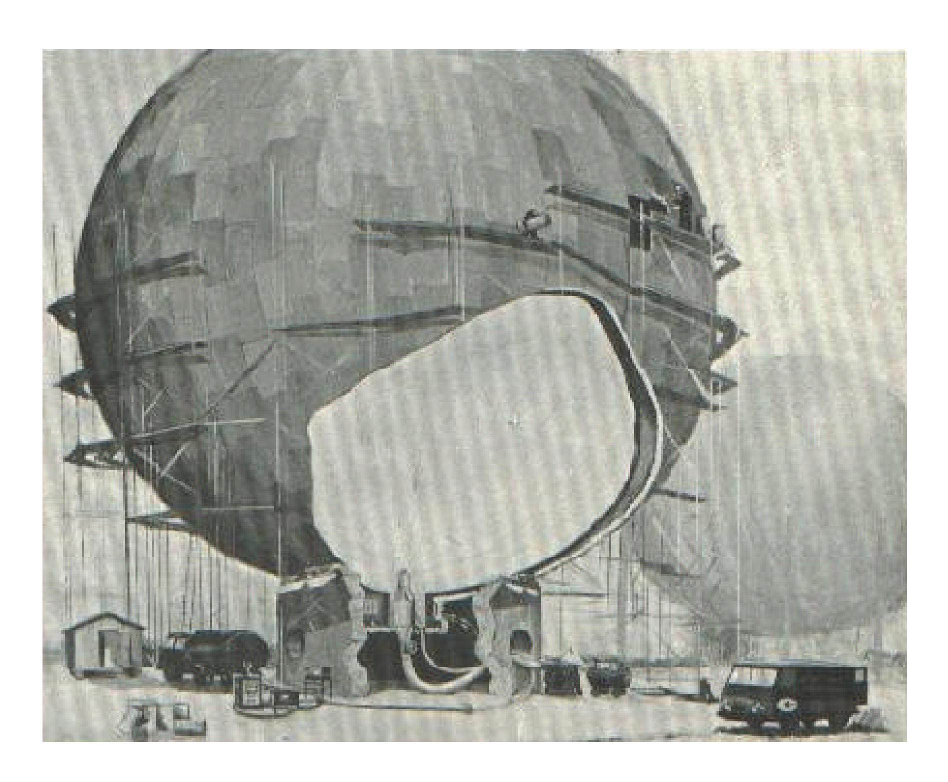


Fig. 2. Esquema de un TTPS integral de un Tanque esférico.

La potencia requerida para el calentamiento del equipo se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$KW = M \times c \times R / 3600 \times E$$

Siendo:

KW: Potencia en Kilowatts

M: Masa de material a ser calentado (en Kg.)

C: Calor específico del material (en KJ / Kg.- ºC). Para acero usar 0,83 Kj / Kg.- ºC.

R: Máxima velocidad requerida de calentamiento. (En ºC / h)

E: Eficiencia de la aislación. (Usar 0,4 Para un equipo bien aislado)

3600 KJ = 1 Kilowatt hora.

860 Kcal. = 1 Kilowatt hora.

La característica mas importante que debe cumplir el quemador a utilizar además de tener obviamente la potencia necesaria (para una esfera de 12 m de diámetro y 1” de espesor de diámetro la potencia oscila alrededor de los 2 Millones de Kcal. / h.) es la Velocidad de salida de los gases calientes que debe ser superior a los 100 m / seg.
Esta velocidad mínima se requiere para obtener dentro del equipo una turbulencia importante con el objeto de uniformizar la temperatura entre la parte superior y la inferior.
El quemador se coloca usualmente en una brida inferior de la esfera, fijado con bulones a ella para un fácil montaje y desmontaje. El combustible utilizado suele ser gas o gas-oil. En el segundo caso prevalece la ventaja de la independencia del suministro de combustible frente a posibles pérdidas de presión de la línea o la imposibilidad de conseguirlo en zonas rurales.
En la esfera o recipiente a tratar se debe realizar una abertura en la parte superior para la salida de los gases colocándose una válvula tipo mariposa graduable.

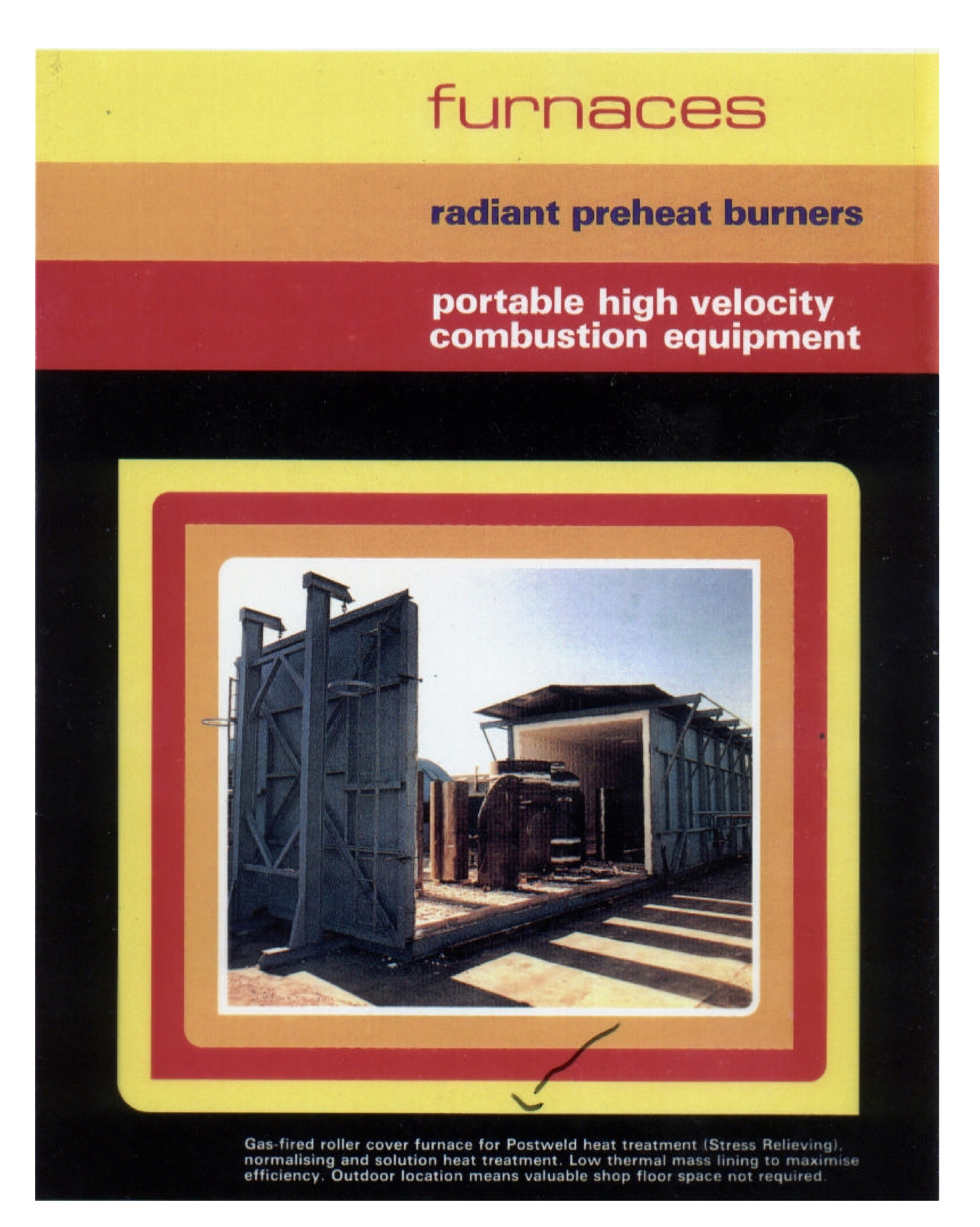


Lámina 1: Ejemplo de Horno portátil

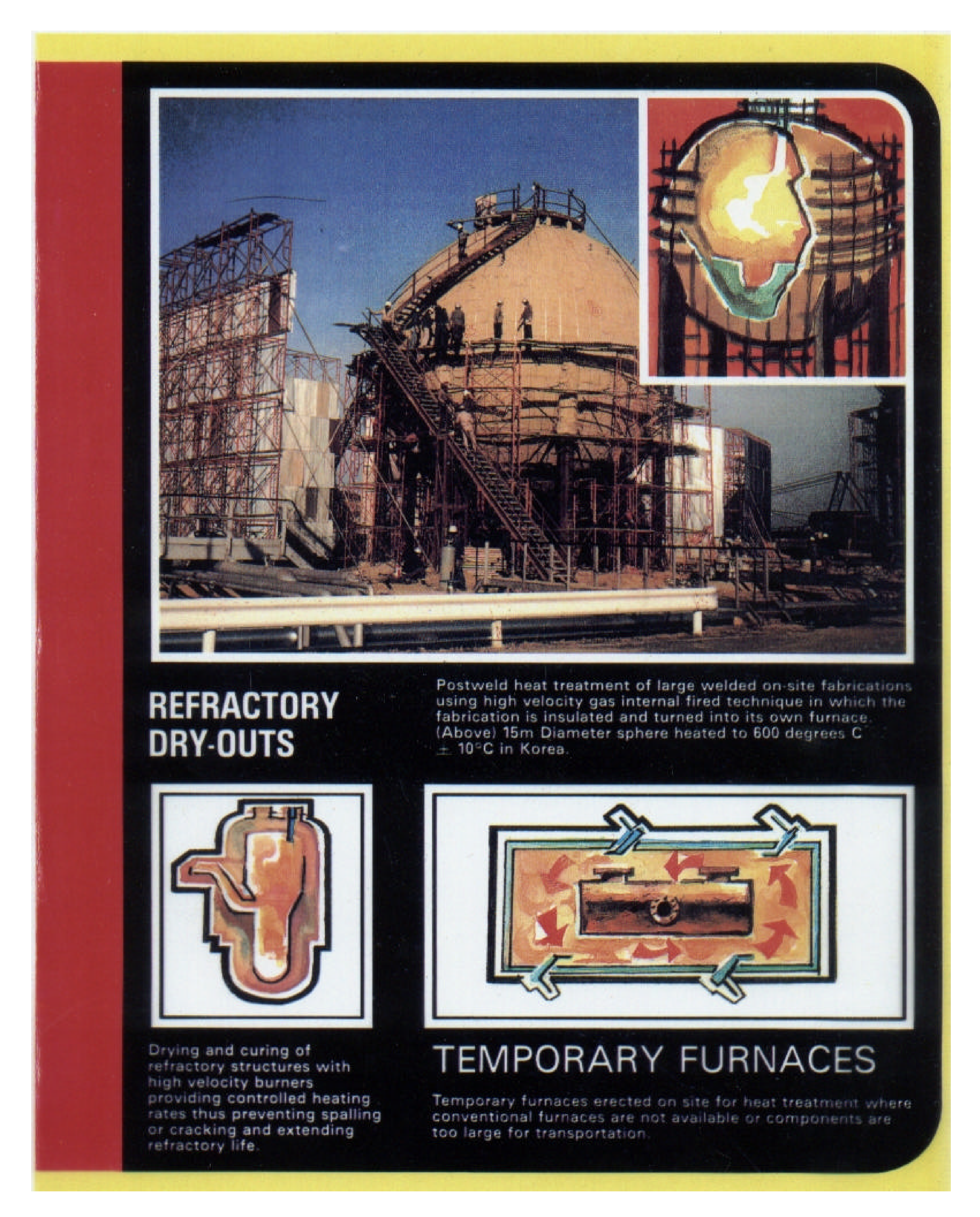


Lámina 2: Ejemplo de Tratamiento por Calefaccionado interno de un tanque esférico y de Secado de refractarios



Lámina 3: Quemador de Alta Velocidad (High Velocity Burner) a gas. Se observa a la izquierda el ventilador centrífugo, y a la derecha el módulo con válvulas reguladoras conectadas a un programador de ciclo térmico y al graforegistrador.

3. TRATAMIENTO TERMICO LOCALIZADO. METODOS. Ver AWS D10.10 "Recommended Practices for local Heating of Welds in piping and tubing"

Durante la fabricación en taller, las soldaduras son tratadas como vimos anteriormente, en horno. Si el tamaño excede las dimensiones del horno o no hay uno disponible, la Unión Soldada y el material base adyacente pueden ser calentados localmente por uno de los métodos descriptos a continuación.

METODO DE CALENTAMIENTO	SE APLICA AL
Resistencias Eléctricas	TTPS o PC
Inducción	TTPS o PC
Llama	PC
Radiación por calefactores a gas tipo infrarrojo	PC
Radiación con lámparas de cuarzo	PC
Exotérmico	TTPS

En el caso de Tratamiento Térmico de Soldadura es muy común utilizar el Tratamiento Localizado solo en la zona de la Soldadura (Se calienta una banda a cada lado del cordón soldado, cuyo ancho está especificado en los códigos).Hay básicamente dos tecnologías diferentes cada una con su aplicación aprovechando la ventajas de una u otra. Un método es el calentamiento por Resistencias Eléctricas y el otro es el Calentamiento por Inducción. Es importante aclarar que el Tratamiento Localizado solo puede ser aplicado a geometrías que permitan la libre dilatación como son las soldaduras circunferenciales.
Las soldaduras longitudinales y las uniones soldadas de conexiones a envolventes no deben tratarse localizadamente* pues el material frío aledaño a la zona calentada no permite a esta la libre dilatación. En el caso de costuras longitudinales la zona calefaccionada no puede dilatarse libremente en la dirección del cordón y en el caso de conexiones a envolvente si calefaccionamos el circulo alrededor de la conexión este no puede dilatarse por que esta restringido por el material frío alrededor de el. En estos casos el material tiende a dilatarse en la dirección del espesor y como esta caliente y blando por el efecto de la temperatura, se deforma plásticamente en esa dirección. Ver Excepción del NBIC en Pág.13 (*)
Cuando la costura longitudinal se enfría, debería contraerse en esa dirección pero el material aledaño que esta frío no se lo permite creándose de esta manera, tensiones residuales longitudinales. En el caso de una conexión a envolvente ocurre algo similar quedando tensiones radiales y tangenciales en el círculo calentado. Si bien esto es así y ASME* no permite realizar TTPS localizados en juntas soldadas longitudinales el Welding Institute recomienda en casos excepcionales hacerlo con valores de ancho de banda suficientemente altos que reducen las tensiones térmicas a valores casi nulos.

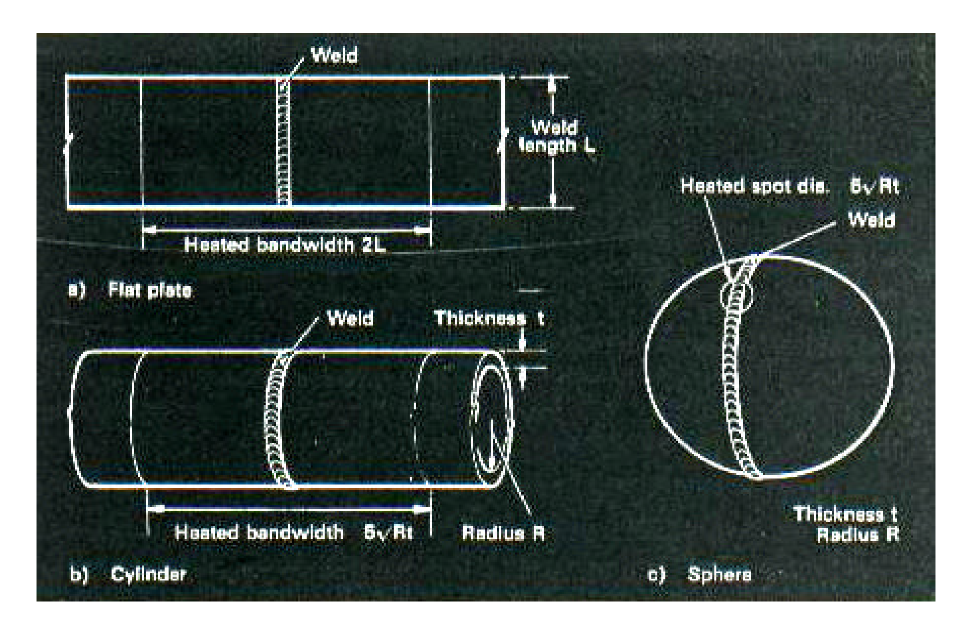


Fig. 3. Ancho de banda en Tratamientos Localizados para conseguir el relevo de las Tensiones Residuales en: a) Chapa plana. b) Juntas a Tope en cilindros c) Juntas a Tope en Esferas. Welding Institute. Abington Hall. Abington. Cambridge.U.K.



Lámina 4: Quemador de Alta Velocidad a combustible gaseoso modular (izq.). Calefactor por radiación (tipo infrarrojo) para Precalentamiento

De la Fig.3a y de la Tabla 3a se puede observar que para una misma longitud del cordón de soldadura, por ejemplo 30", en el caso de ser circunferencial (corresponde a un caño de aproximadamente 10"de diámetro) el ancho de banda se calcula con AB = 5vRt donde R es el radio del caño y t su espesor (1") que da como resultado un ancho de banda de 11,2".
En cambio si ese mismo cordón, en vez de ser circunferencial es plano (corresponde a una chapa plana) el ancho de banda se calcula con AB = 2L y el resultado es un ancho de banda de 60" mostrando que el calentamiento localizado de la configuración plana necesita un ancho de banda mayor ya que genera tensiones térmicas superiores a la de la configuración circular correspondiente a un caño debido precisamente a que la configuración plana impide, como ya lo explicamos anteriormente, la libre dilatación del cordón de soldadura durante el calentamiento localizado.

*** El NBIC (National Board Inspection Code) adenda 2003 estipula que cuando el PWHT integral, o de la banda que contiene a la conexión de equipos esféricos o cilíndricos, es impractico o perjudicial se puede calentar un circulo alrededor de la conexión, (bulls eye method) que se extiende como mínimo 2" o el espesor (el menor) en todas las direcciones a partir de la soldadura.**
Este tipo de "poncho" no está permitido como método de fabricación pero si de reparación.

TABLA 3a

Diámetro de caño o tubo	Espesor t	Longitud del cordón ˜	Ancho de banda caño = 5vRt	Ancho de banda chapa plana = 2L
3"	1"	10"	6"	20"
6"	1"	20"	8,7"	40"
10"	**1"**	**30"**	**11,2"**	**60"**
12"	1"	40"	12,2"	80"
16"	1"	50"	14"	100"
19"	1"	60"	15"	120"
22"	1"	70"	16,6"	140"
25"	1"	80"	17,7"	160"
28"	1"	90"	18,7"	180"
32"	1"	100"	20"	200"

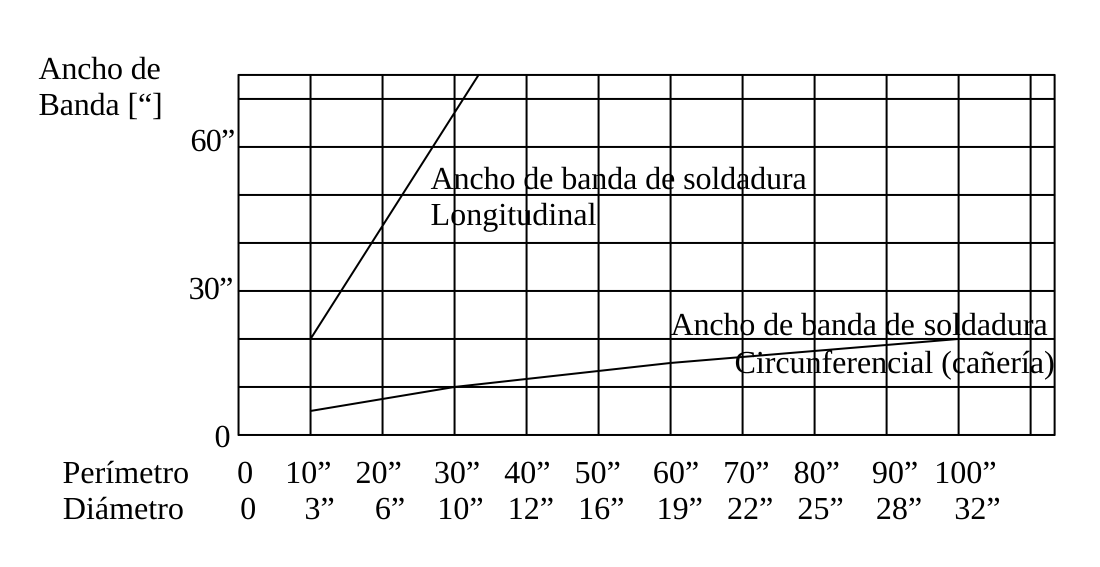
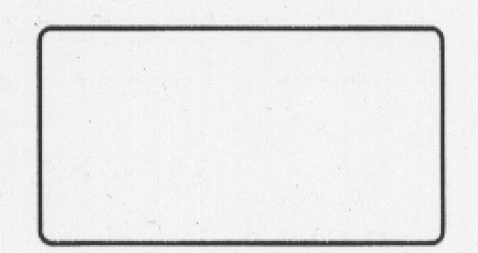


FIG. 3a

FURNACE
HEAT TREATMENT



POST WELD HEAT TREATMENT - ASME VIII, B.S. 5500 etc.
NORMALISING
SOLUTION HEAT TREATMENT (1050°C WITH AIR QUENCH)

ONE OF THE LARGEST
HEAT TREATMENT
FURNACES
IN THE NORTH WEST
11.7M x 3.7M x 3.7M
WITH PROVISION FOR EXTENSIONS.
50 TONNE HEARTH LOADING.

Lámina 5. Horno portátil Modular para 50Ton de carga y 11,7m de longitud, 3,7 m de altura y 3,7 m de ancho

3.1 RESISTENCIAS ELECTRICAS CON CALEFACTORES FLEXIBLES

El Tratamiento Térmico localizado consiste en calentar a la Temperatura de Tratamiento la unión soldada y una banda e material base a cada lado del cordón de soldadura.
Para ello se colocan sobre la banda de calentamiento calefactores eléctricos flexibles de diversas configuraciones que se adaptan a la forma de la parte tratada. Estos calefactores se fabrican con un cable de Nicron que oficia de resistencia eléctrica rodeado por cuentas cerámicas.
Estos calefactores son alimentados en general por una tensión no superior a 85V, por seguridad del personal de la obra. Su potencia oscila alrededor de los 4 Kw.

El equipamiento necesario para calentamiento por resistencias eléctricas incluye además:

.- Aislación refractaria de fibra cerámica.
.- Fuente de poder, en general son equipos con un transformador de 70Kw.
.- Programadores de ciclo térmico, generalmente son seis (6) por equipo lo que indica que se puede realizar seis (6) Tratamientos distintos al mismo tiempo.
.- Registrador de temperaturas de hasta 12 Termocuplas
.- Termocuplas tipo K aisladas en seda de vidrio con alambre de 0,5 / 0,8 mm de diámetro, para ser soldadas por descarga Capacitiva
.- Soldador de TC por descarga Capacitiva

3.1.1 Ventajas

1.-Se puede mantener una temperatura de precalentamiento uniforme y continua durante la soldadura y durante las interrupciones de la misma en forma automatizada.
2.-La Temperatura puede ajustarse con exactitud y rápidamente.
3.-Los soldadores trabajan confortablemente y no necesitan interrumpir la soldadura para elevar la temperatura de precalentamiento. No hay quemadores que incomoden los movimientos del soldador.
4.-Puede distribuirse el calor no uniformemente como ocurre en la parte superior e inferior de una cañería horizontal o en piezas de distintos espesores como caños soldados a bridas de gran masa o espesor entregando mayor calor a las secciones gruesas y así mantener la temperatura uniforme.

3.1.2 Desventajas
1.- Los calefactores pueden quemarse durante el Tratamiento
2.- Pueden ocurrir cortocircuitos entre el calefactor y la cañería quedando marcas en la misma. Esto no es frecuente si se usan calefactores en buen estado y adecuados.

3.1.3 RESISTENCIAS ELECTRICAS. Tipo four-bank. Método de la Mampara

Dentro del método de Calentamiento por resistencias eléctricas, además de los calefactores flexibles mencionados anteriormente existe un método que se llama **" De la Mampara"** que pasaremos a describir:

Cuando el ancho de banda de calentamiento es muy grande, por ejemplo en un recipiente de 3000 mm de diámetro y una pulgada de espesor el ancho de banda según ASME VIII sería dos veces el espesor a cada lado del cordón de soldadura, o sea aproximadamente 5" (130 mm) para nuestro ejemplo.

Hay veces que las Especificaciones de Ingeniería exigen que el ancho de banda sea por ejemplo, como ya ha ocurrido, 1200 mm en vez de 130mm. En estos casos cubrir toda la superficie de la banda demandaría muchos calefactores flexibles (150 en vez de 35), una gran cantidad de Termocuplas y maquinas de Tratamiento Térmico.

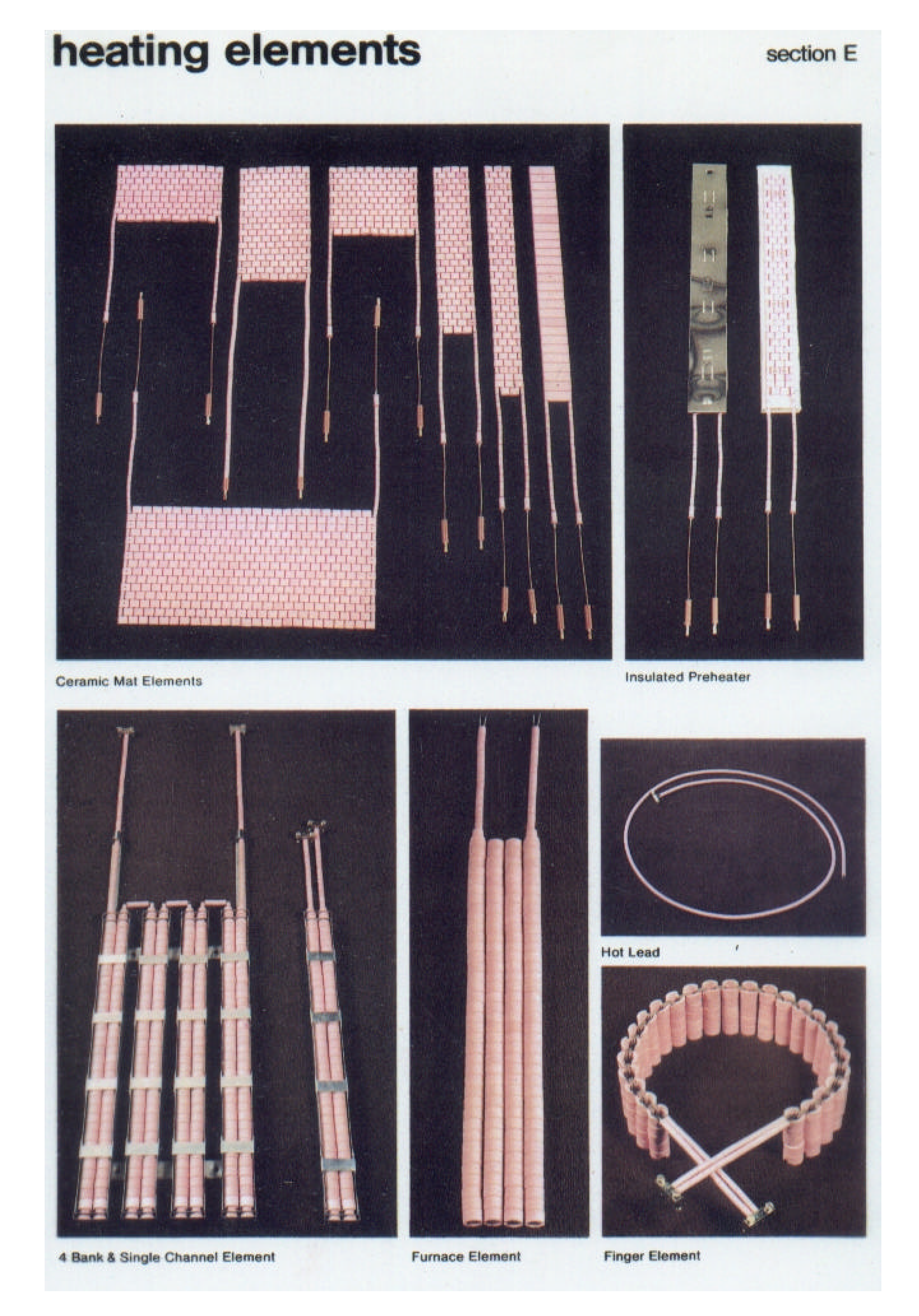


Lámina 6: Elementos calefactores para TTPS y PC localizado.

En estos casos se puede proceder de la siguiente manera:

Se aísla exteriormente la banda de calentamiento y se colocan interiormente, donde finaliza la banda a calentar, dos "tapas" o mamparas aisladas con el objeto de crear un compartimiento que funciona como un horno donde se encuentra el propio recipiente, aislado exteriormente.

Dentro del compartimiento se colocan bandejas calefactoras de 12Kw de potencia (calefactores tipo Four-Bank) sobre estantes metálicos a diferentes alturas pero siempre dentro del tercio inferior del recipiente, ya que el aire caliente siempre tiende a elevarse. Estos calefactores son de 220V (tener en cuenta tema seguridad), se disponen eléctricamente en estrella y de esta manera con 12 calefactores y una fuente de tensión trifásica es suficiente para lograr las temperaturas de hasta 720ºC que se requieren como máximo en Tratamiento Térmico. Con un posicionamiento adecuado de los calefactores se logra mantener una temperatura uniforme en todo el perímetro de la banda de calentamiento.

.

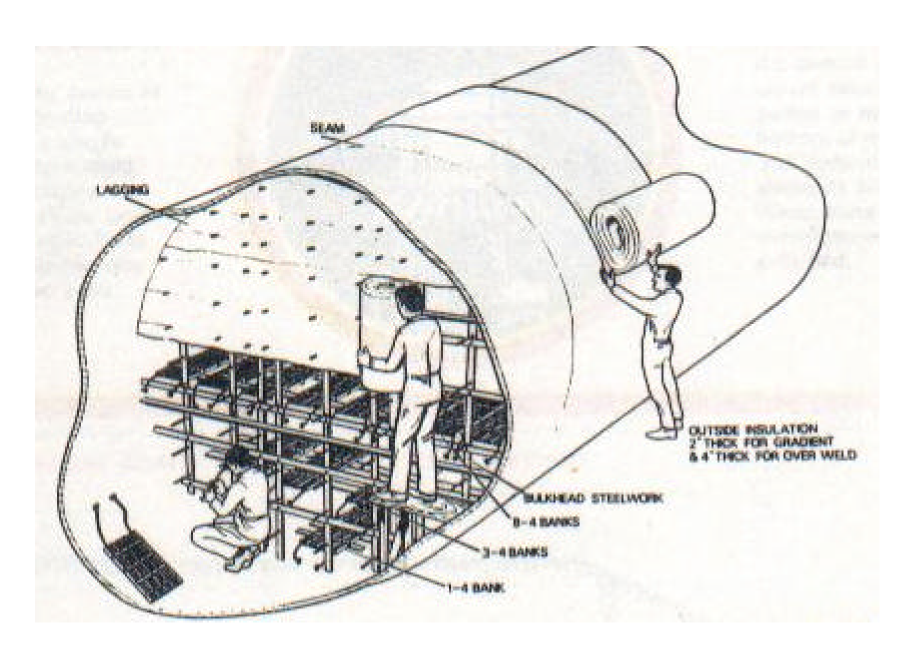


Fig. 4. Método de la Mampara

3.2 CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Consiste en aplicar una corriente alternada (AC) a las espiras de un cable enrollado en la parte a ser calentada. Debido a que toda corriente eléctrica tiene asociado a ella un campo magnético, que penetra en el metal cercano a las espiras. Este campo alterno produce corrientes inducidas en el material, también llamadas corrientes “eddy” que por resistencia eléctrica del mismo se calienta. El espesor de la zona calentada depende de la frecuencia de la corriente de las espiras. Cuanto mayor sea la frecuencia más fina será la capa calentada. Por supuesto que con el transcurso del tiempo el centro de la pieza también se calienta por conducción pero se corre el riesgo de sobrecalentar la superficie. Por lo tanto deben evitarse las altas frecuencias ya que las temperaturas de la superficie y del centro deben estar dentro del rango permitido por el Procedimiento de Soldadura para lograr Distensionados o Ablandamientos satisfactorios. Las frecuencias mas utilizadas en Tratamiento Térmico varia entre 60 y 400 Hertz (Hz).

3.2.1 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y TEMPERATURA DEL MATERIAL

En materiales magnetizables el campo magnético solo se encuentra en el espacio dentro de las espiras y concentrado en el material. Si el material no es magnetizable el campo magnético se encuentra distribuido dentro de las espiras, tanto en el material a calentar como en el aire que hay entre las espiras y el. Cuando esto es así debe entregarse más energía para poder alcanzar la temperatura requerida ya que el campo magnético en el aire no calienta el metal.

Los aceros al carbono son magnéticos debajo de los 760ºC (Punto de Curie) mientras que los inoxidables Austeníticos y la mayoría de los metales no ferrosos no son no magnéticos tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.
Cuando la Temperatura de un material magnético supera el punto de Curie, y las líneas de campo penetran en el espacio que hay dentro de la cañería (aire) en vez de concentrarse solo en el espesor de la cañería, hay una menor resistencia a la corriente eléctrica en la bobina. Como resultado, el valor de la corriente en la bobina se eleva repentinamente. En materiales magnéticos sobre el punto de Curie y en los no magnéticos siempre, es recomendable enfriar las espiras fabricándolas de tubos por donde circula agua o algún otro refrigerante. Otra consecuencia de perder eficiencia por no tener todo el campo concentrado en el espesor es la necesidad de aumentar el número de espiras llegando a 60 en vez de 10 como se acostumbra, además el equipo debe ser capaz de entregar la mayor potencia requerida.

3.2.2 VENTAJAS RELATIVAS DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

1.- Son posibles altas velocidades de calentamiento
2.- La temperatura puede ser controlada dentro de un margen estrecho.
3.- Pueden evitarse más fácilmente Sobrecalentamientos localizados.
4.- Las mangueras tienen una vida útil mayor y son menos propensas a fallar que los calefactores eléctricos.

3.2.3 DESVENTAJAS

1.- El costo del equipamiento es mayor que en otros métodos.
2.- El tamaño del equipamiento es mayor mas pesado y menos portable.
3.- No compensa las diferencias de temperatura entre la parte superior e inferior de una cañería horizontal y en el caso de variaciones de espesor.
4.- Si se usa para precalentar es necesario apagar el equipo durante la soldadura debido al soplo del arco.
5.- No se pueden realizar distintos tratamientos al mismo tiempo.

3.3 CALENTAMIENTO POR LLAMA. Ver"ANSI / AWS D10.10-90. 5.1"

En calentamientos localizados de soldaduras con una o más llamas (torchas), la operación de calentamiento es **más un arte que una ciencia**. La cantidad de calor aportado y la concentración del mismo dependen no solo de la cantidad de combustible y de la calidad de la combustión sino también del ajuste de la llama, la distancia entre la llama y la soldadura, el manejo de la llama por el operador, y el control de las pérdidas de calor a la atmósfera. En vista de lo anterior es preferible la utilización de otros métodos.
El calentamiento por llama es útil en precalentamiento de soldadura a bajas temperaturas (< 200°C) o piezas pequeñas. Este método debe aplicarse con cuidado y solo por un operador / supervisor con experiencia. Tiene una mínima precisión, repetibilidad, y mínima uniformidad de temperatura. El riesgo de dañar la soldadura es realmente alto.

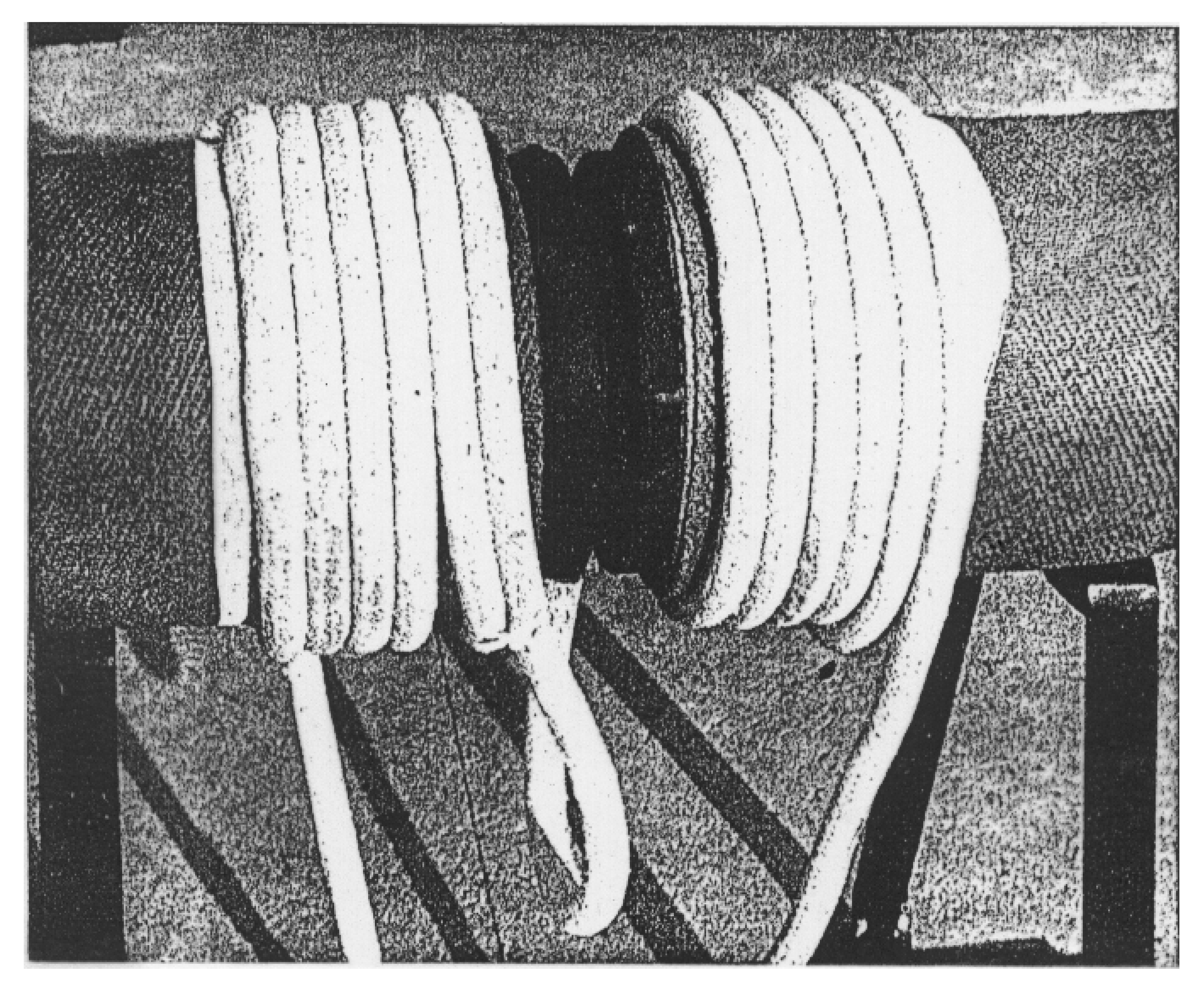


Lámina 7. Precalentamiento de una unión soldada por Inducción.

4. MEDICION DE TEMPERATURA

En la utilización de Tratamientos Térmicos es necesario medir la Temperatura. La determinación visual de Temperaturas por intermedio del color sin la ayuda de instrumentos debe evitarse tanto debido a la falta de precisión como a la dependencia en la destreza del operador.
Se pueden utilizar lápices y pinturas de Temperatura, Termocuplas o Pirómetros ópticos, dentro de los más utilizados para medir y/o controlar la Temperatura.

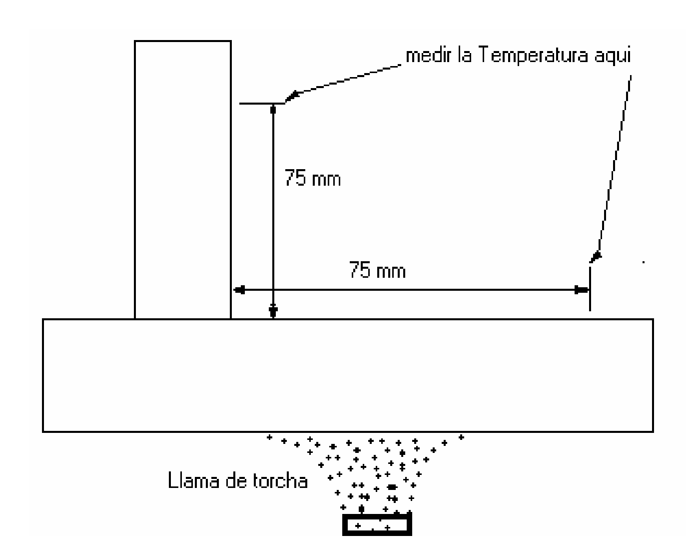


Fig.5 La Temperatura de PC debe ser medida a suficiente distancia de la línea de la soldadura (75mm) sobre el lado opuesto al calefaccionado. Si la temperatura solo puede controlarse del lado calefaccionado, la fuente de calor debe retirarse durante 1 minuto por cada pulgada de espesor para permitir la igualación de temperatura antes del control de la misma. "Welding steels without Hydrogen cracking" The Welding Institute

4.1 LAPICES DE TEMPERATURA

Estos elementos tienen una composición química tal, que funden cuando la temperatura supera su punto de fusión. Si el lápiz de Temperatura funde, marca el metal y eso significa que la temperatura de este está por encima de la temperatura de fusión del lápiz. Aun así no sabemos cuanto por encima, por eso se usan dos lápices para determinar entre que temperaturas realmente esta el metal. Por supuesto debe haber acceso a las superficies a marcar. Es un método idóneo para PC.

4.2 TERMOCUPLAS

El principio a partir del cual opera la Termocupla se deriva del Efecto Seebeck (también llamado Efecto Peltier) descubrimiento de **Seebeck**, que establece que si se forma un circuito eléctrico utilizando dos conductores metálicos distintos con una unión a más alta temperatura que la otra, entonces por el circuito circula corriente eléctrica. La Fem. [Volts] resultante es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las juntas fría y caliente. De lo anterior surge que un instrumento calibrado puede traducir voltajes en lecturas de temperatura de junta caliente. Cada combinación de tipo de conductores requiere una calibración particular y un instrumento apropiado.
El material de los conductores de las Termocuplas solo debe usarse en la condición de recocido con enfriamiento lento. El trabajado en frío, que a veces se produce durante la fabricación debe eliminarse con un recocido a 1000ºC durante un mínimo de 15 minutos con un posterior enfriamiento lento hasta 500ºC. Una mas completa discusión sobre Termocuplas y su uso puede verse en ANSI, estándar MC96.1, Temperature Measurement Thermocuples. En 1986 se uniformaron las normas Europeas DIN, BS, NF y las ANSI de EEUU en la Norma IEC 584 (Internacional Electrotechnical Comisión).

De los siete tipos de Termocuplas citadas en ese documento tres son los más utilizados en Tratamiento Térmico de Soldadura.

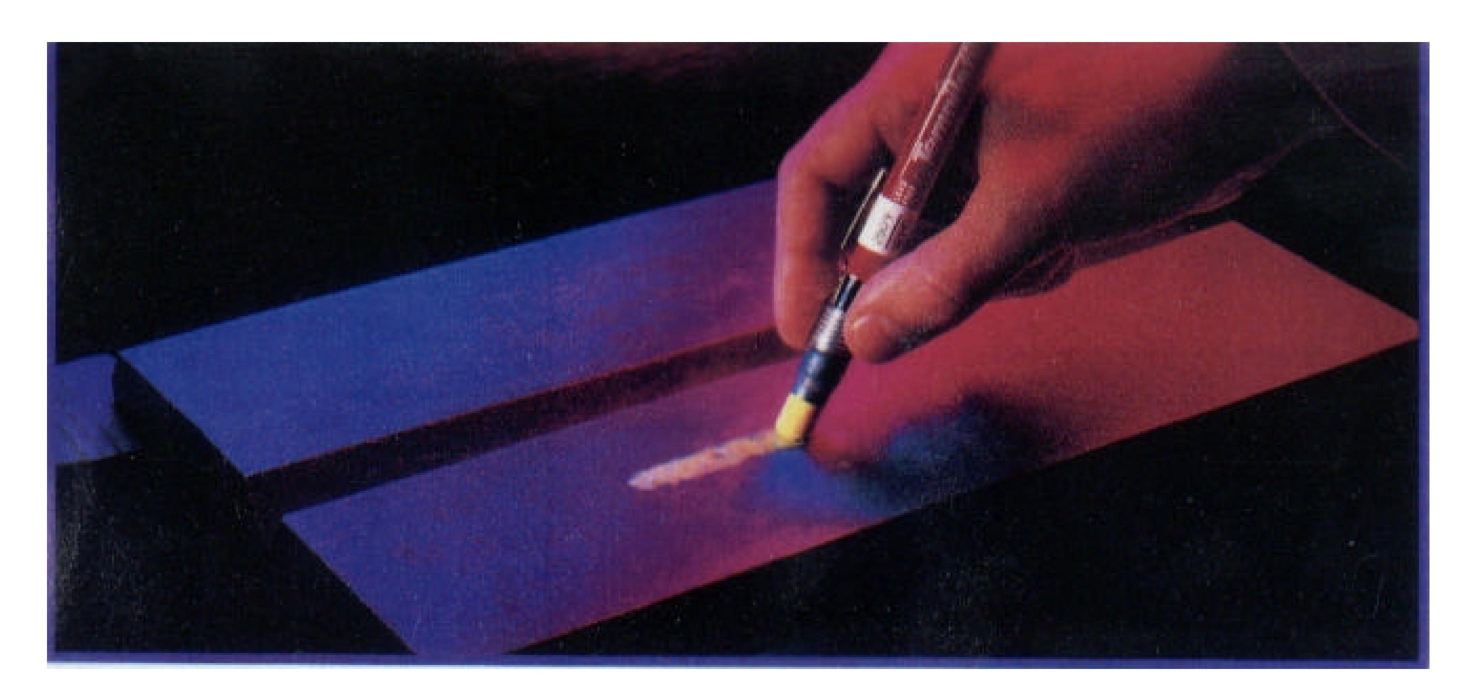


Lámina 8: Utilización de Lápiz de Temperatura

Su clasificación, composición nominal, límites de temperatura y código de colores están en la siguiente tabla

Tipo	Denominación	Material	Temp. máxima	Código de color ANSI MC96.1			Código de color IEC 584		
				Positivo	Negativo	Cubierta	Positivo	Negativo	Cubierta
K	Chromel -Alumel	NiCr-Ni	1260ºC	Amarillo	Rojo	Amarillo	Verde	Blanco	Verde
J	Hierro-Constantan	Fe-CuNi	760ºC	Blanco	Rojo	Negro	Negro	Blanco	Negro
E	Chromel-Constantan	NiCr-CuNi	870ºC	Violeta	Rojo	Violeta	Violeta	Blanco	Violeta

El tipo de letra esta relacionado solo con la relación Volt - Temperatura y no con el material ya que puede haber varios que cumplan con esa relación.
Al termopar Tipo K se lo conoce también como Chromel-Alumel (marca registrada de Hoskins Manufacturing Co. EEUU). El Chromel es una aleación de aproximadamente 90% de Ni y 10% de Cr. El Alumel es una aleación de 95% de Ni mas Al-Si-Mn razón por la cual la norma IEC la especifica NiCr-Ni. Este termopar es el más utilizado por resistir mayores temperaturas que el termopar J.
Los termopares tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1260ºC y es el termopar mas satisfactorio para trabajar en atmosferas reductoras, sulfurosas o vacío.
Los diámetros de los alambres están relacionados con la respuesta, cuanto mas fino mayor será la velocidad de reacción de la Termocupla pero menor la vida útil. El diámetro comúnmente utilizado es de 0,8mm.Si la Termocupla es consumible como normalmente ocurre en TTPS no conviene utilizar mayores diámetros por el costo que esto implica.
Las Termocuplas deben aislarse eléctricamente y térmicamente, para ello se reviste a cada conductor con una malla de seda de vidrio y a su vez a los dos conductores con otra malla del mismo material para asegurar la aislación.
Las Termocuplas se conectan a los instrumentos de medición y control con cables de compensación que tengan la misma característica Volt- Temperatura que la Termocupla (ambos deben ser por ejemplo K).

CODIFICACIÓN DE COLORES PARA CABLES DE TERMOCUPLA

Tipo	Con d.	ANSI MC 96.1			DIN43714			BS1843			IEC584-3		
		+	-	vaina	+	-	vaina	+	-	vaina	+	-	vaina
T	TX	azul	rojo	azul	rojo	marr	marr	blan	azul	azul	marr	blan	Marr
J	JX	blan	rojo	negr	rojo	azul	azul	amar	azul	negr	negr	blan	negr
E	EX	Viole	rojo	viole				marr	azul	marr	viol	blan	viol
K	WX				rojo	verde	verde						
K	KX	azul	rojo	azul	rojo	verde	verde	marr	azul	rojo	verd	blan	verd
K	VX				rojo	verde	verde	blan	azul	rojo			
S/R	SX	negr	rojo	gris	rojo	blan	blan	blan	azul	verde	narj	blan	narj
B	BX	gris	rojo	gris									

Propiedades de termocuplas satandard (Metals Handbook)

Tipo	termoelementos	Composición	Punto de Fusión	Resistividad n? . m	servicio	Max TºC	Máx. ºF
J	JP JN	Fe 44Ni-55Cu	1450 1210	100 500	Oxidante o reductor	760	1400
K	KP KN	90Ni-9Cr 94Ni-Al,Mn,Fe,Si,Co	1350 1400	700 320	Oxidante	1260	2300
T	TP TN	OFHC Cu 44Ni-55Cu	1083 1210	17 500	Oxidante o reductor	370	700
E	EP EN	90Ni-9Cr 44Ni-55Cu	1350 1210	700 500	Oxidante	870	1600
R	RP RN	87Pt-10Rh Pt	1860 1769	196 104	Oxidante o inerte	1480	2700
S	SP SN	90Pt-10Rh Pt	1850 1769	189 104	Oxidante o inerte	1480	2700
B	BP BN	70Pt-30Rh 94Pt-6Rh	1927 1826	190 175	Oxidante vacio o inerte	1700	3100

4.3 FIJACIÓN DE TERMOCUPLAS

Se han usado varios métodos para fijar las Termocuplas a la superficie a Tratar Térmicamente. Siempre el objetivo fue tratar de lograr un buen contacto para minimizar los errores de medición. Al principio se solía agujerear la superficie del metal, colocar dentro el extremo de la Termocupla y luego martillar los bordes del agujero. También se soldaba una varilla roscada a la superficie a tratar y luego se apretaba a la Termocupla por medio de una arandela de gran espesor y tuerca. Otro método ya mas sofisticado era soldar un trozo de planchuela a el metal a tratar, en esa planchuela se hacia un agujero cónico donde se clavaba una Termocupla con una vaina también cónica, De esta manera se obtenía un excelente contacto térmico pero la desventaja era que las Termocuplas eran muy costosas.
El método utilizado hoy día es fijar cada alambre de la Termocupla por separado y a una distancia de aproximadamente cinco mm (5mm) a la superficie por intermedio de una Soldadura por Descarga Capacitiva (Ver Figura 1)

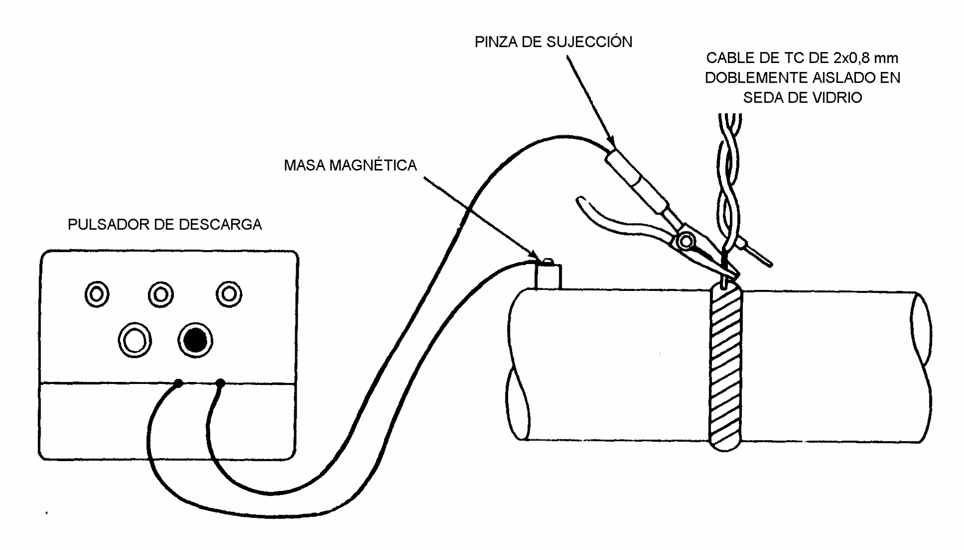


Fig. 6. Soldadura de Termocuplas por Descarga Capacitiva

Este sistema es práctico, asegura un buen contacto entre la TC y el material a sensar, posee una reacción muy rápida y su exactitud es suficiente a pesar de la soldadura por separado de los alambres de la Termocupla.

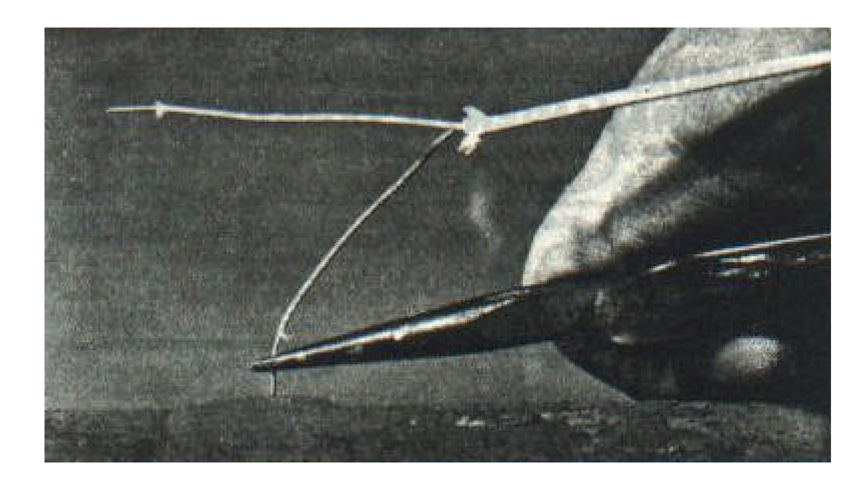


Fig. 7 Soldadura de una TC por descarga capacitiva.



Fig. 8. Soldadura de Termocuplas por Descarga Capacitiva. La ZAC es inferior a 0,3 mm

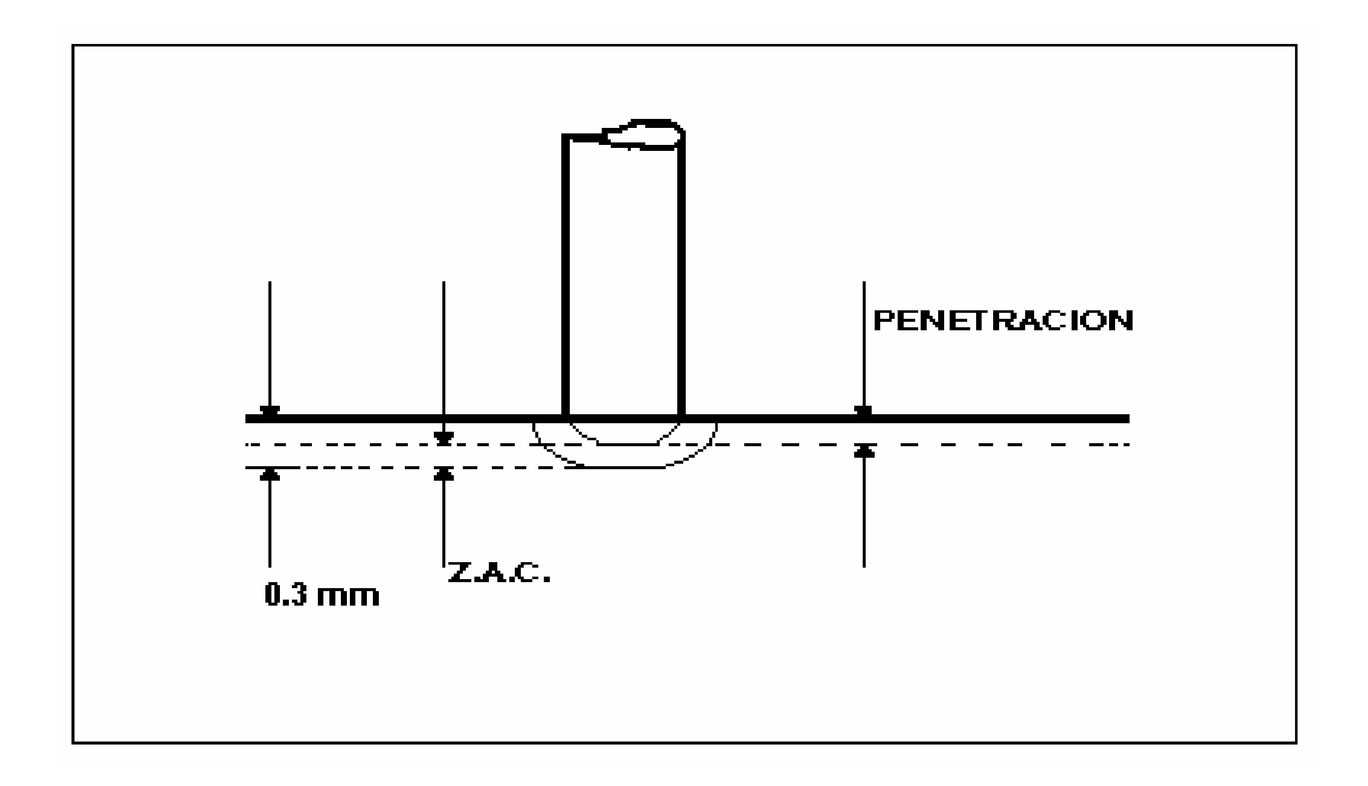


Fig. 9. ZAC de la Soldadura por descarga Capacitiva

SECCIÓN II.

EFECTOS INDESEABLES DEL CICLO TÉRMICO DE SOLDADURA

5. LA SOLDADURA, UN TRATAMIENTO TÉRMICO

.- Soldar, es llevar los bordes de las partes a ser unidas hasta el punto de fusión adicionándole o no un metal de aporte y luego permitir al conjunto enfriarse hasta Temperatura ambiente.

.- Lo más relevante de este proceso es sin duda el calentamiento localizado seguido de enfriamiento que produce en las piezas soldadas una serie de EFECTOS INDESEABLES.

.- Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son elevadas. La velocidad máxima alcanza los 300ºC / seg. durante el calentamiento y/o enfriamiento a un nivel de temperatura de 1000ºC, reduciéndose al disminuir la temperatura a valores de 6ºC / seg. a 550ºC.

La Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura puede aproximarse con la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Ve = 2\,p\,K\,(Tc - To)^2 / H\ input.}$$

Ve: Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura
K: Conductividad térmica del metal (Joule/ m seg. ºC)
K acero 0,2% C, 0,6% Mn: 0,028
K cobre : 0,20
K aluminio : 0,12
To: Temperatura inicial del metal base (T de precalentamiento)
Tc: Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento
H Input: Heat Input o Calor Aportado (J / mm)

5.1 EFECTOS INDESEABLES DEL CICLO TÉRMICO DE SOLDADURA

Son esencialmente tres (3)

.- Generación de Tensiones Residuales y/o distorsión
.- Modificación de la Estructura Metalografica
.- Absorción de gases por el metal fundido.

5.1.1 TENSIONES RESIDUALES Y/O DISTORSIÓN

Lectura Recomendada: Welding Handbook.Vol.I.Welding Technology.Pag.136 y 226.

Las construcciones soldadas contendrán usualmente Tensiones Residuales del orden de la resistencia a la Fluencia paralelas al eje de la Soldadura y una fracción de la misma (dependiendo del grado de embridamiento, espesor, o restricción a la contracción) en las direcciones perpendiculares al cordón. Las Tensiones Residuales también pueden estar presentes en el material base producto del laminado, rolado u otros Tratamientos Térmicos anteriores.
La mayoría de los Metales al calentarse se dilatan. Si el calentamiento es localizado como ocurre durante la soldadura, la falta de uniformidad de la Temperatura produce dilataciones diferentes en distintos puntos de la pieza en un mismo instante generándose por esa razón Tensiones Térmicas.

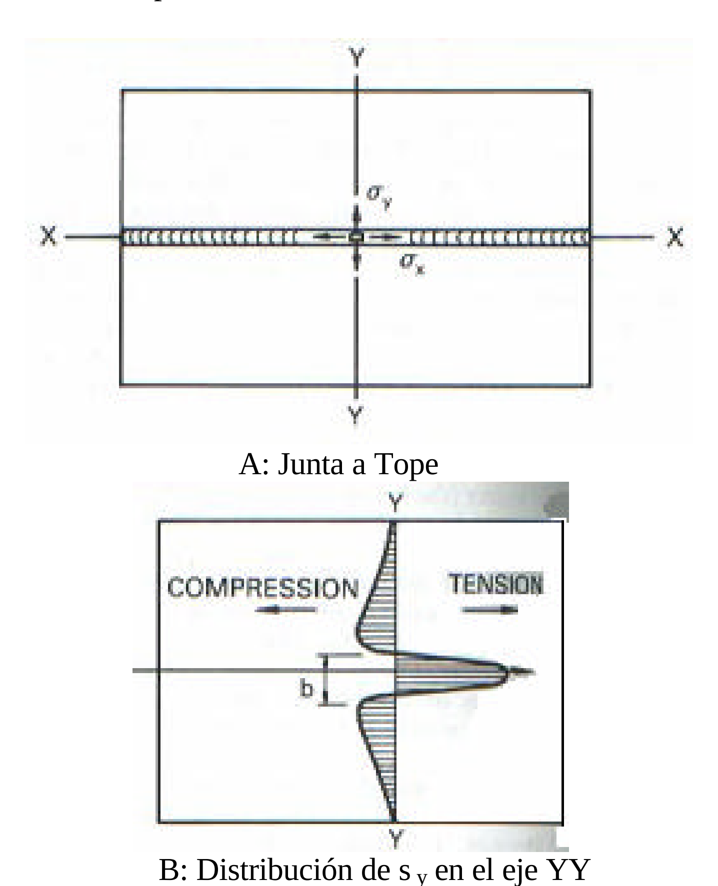
Si estas Tensiones alcanzan el Límite de Fluencia algo que ocurre normalmente en el cordón de soldadura, se produce deformación plástica localizada que luego en el enfriamiento genera Tensiones Residuales y / o distorsión.
Las Tensiones Residuales son un sistema de Tensiones dentro de la parte soldada que se compensan ellas mismas y pueden existir en ausencia de una carga externa.
Esto significa que si hay en una parte del material Tensiones residuales de tracción seguramente en otra parte del mismo habrá Tensiones Residuales de compresión que mantienen en equilibrio el conjunto.

En una Soldadura existen Tensiones Residuales tanto longitudinales como transversales al cordón. Se puede ver en la soldadura de dos chapas planas que las Tensiones longitudinales son de Tracción en el cordón de Soldadura siendo balanceadas por Tensiones de Compresión en el metal base adyacente.
En el caso de tensiones Transversales la parte media del cordón está sometida a Tensiones de Tracción mientras que los extremos están sometidos a compresión. También puede haber Tensiones Residuales en la dirección del espesor particularmente en el caso de secciones gruesas. Fig.10.

Conviene notar que cuando se aplica una carga externa de tracción las Tensiones Residuales de Tracción aumentan mientras que las de compresión disminuyen.

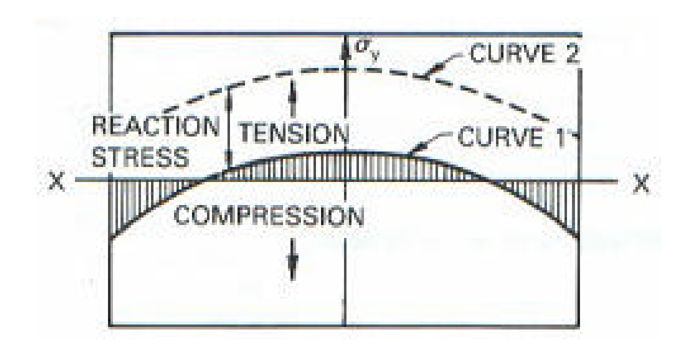
Si continuamos aumentando la carga externa, las Tensiones de Tracción alcanzan el punto de fluencia, sin superarlo. Con cargas externas mayores lo único que ocurre es un aumento de la zona del material bajo fluencia y la disminución de las Tensiones residuales de Compresión.
Si en este estado se disminuye la carga externa, el pico de Tensiones Residuales de Tracción se hace menos agudo y las Tensiones Residuales disminuyen.

Si el aumento de la carga externa hace desaparecer a las Tensiones Residuales de Compresión por completo entonces durante la descarga se observará que las Tensiones Residuales de Tracción también habrán desaparecido gracias a que el material alcanzó la fluencia.
Este hecho ha sido reconocido en algunas especificaciones las que requieren que ciertas estructuras sean sobrecargadas hasta la fluencia para eliminar Tensiones Residuales.



A: Junta a Tope

B: Distribución de s_y en el eje YY



C: Distribución de s $_x$ en el eje XX

Fig. 10. Distribución Típica de Tensiones Residuales en una Junta a Tope. Welding Handbook Vol. I. (7.10)

El efecto de las Tensiones Residuales en el comportamiento de estructuras soldadas es significativo solo en fenómenos que tienen lugar a bajas tensiones, tales como Fatiga, Fractura Frágil y Corrosión Bajo Tensión.
Las Tensiones Residuales pueden influir en algún modo de falla, o características en Servicio del material, pero no necesariamente producen daño.

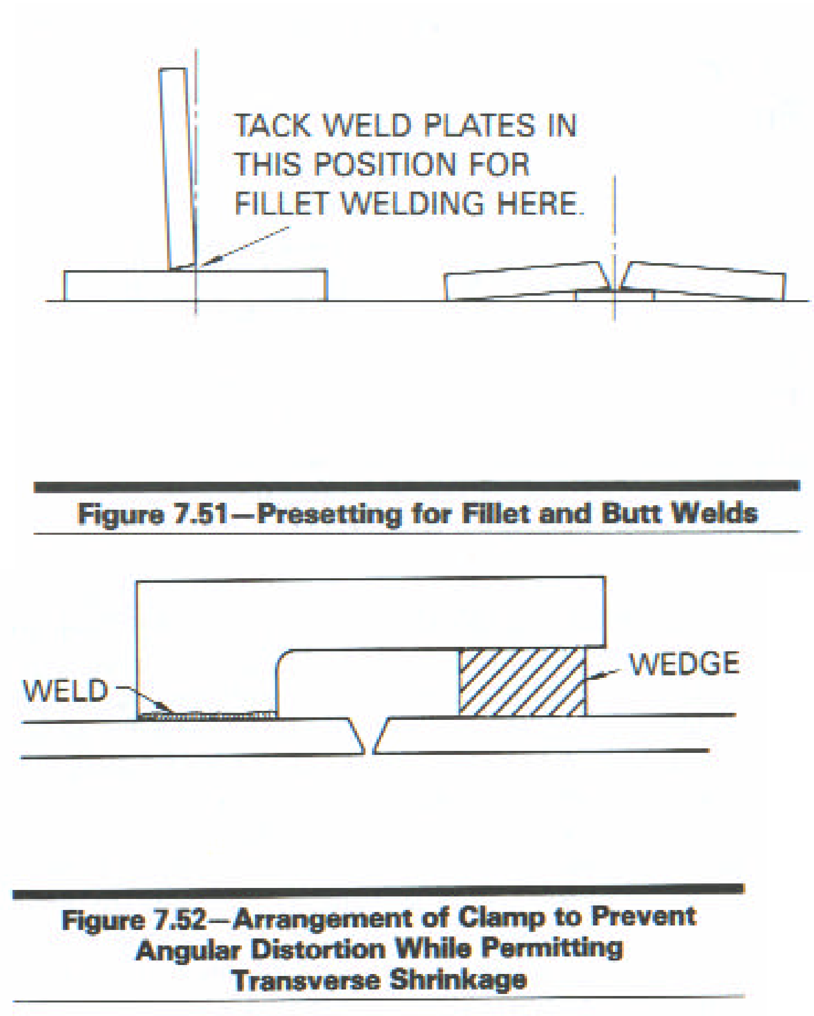


Fig. 11. Debe estimarse la distorsión que tendrá lugar durante la Soldadura y compensarla por intermedio de la presentación de las partes a soldarse. Debe recordarse que si no queda distorsión quedan Tensiones Residuales y viceversa.Welding Handbook.Vol I.(7.51y 7.52)

Los efectos de las Tensiones Residuales en el modo de Falla se pueden resumir en lo siguiente:

1) **Fluencia y Colapso Plástico.** El efecto de las Tensiones Residuales es insignificante para estructuras Soldadas bajo tensiones superiores a la fluencia.
2) **Fractura.** A medida que el nivel de las tensiones aplicadas aumenta, el efecto de las Tensiones Residuales disminuye. Se suman a las Tensiones aplicadas. Cuando se combinan pueden causar fluencia localizada haciendo necesaria alguna corrección en el diseño. Son perjudiciales en situaciones de baja tenacidad (Ej. Debajo de la Temperatura de Transición para aceros estructurales) pero no necesariamente en situaciones de alta Tenacidad.
3) **Fatiga.** Las Tensiones Residuales de Compresión pueden mejorar la resistencia a la fatiga de estructuras Soldadas. Las Tensiones Residuales de Tracción en cambio disminuyen la resistencia a la fatiga ya que elevan la Tensión Media y la Relación entre la Tensión Mínima y la Máxima (fmin/fmax). Su efecto es perjudicial al evitar el cierre de la fisura. Aumentan la Relación fmin. / fmax. independientemente de la Relación de las tensiones aplicadas. Las Tensiones Residuales de Compresión retardan o anulan el crecimiento de fisuras por fatiga al reducir fmin / fmax e inducir el cerramiento de la fisura. Se pueden introducir Tensiones de Compresión localizadas por calentamiento local, compresión local, martillado, o sobrecargas. El efecto de las tensiones residuales tiende a disminuir luego de cargas repetidas."Fatigue Strength of Welded Structures.K.G.Richards.The Welding Institute"
4) **Corrosión bajo Tensión.** En un ambiente apropiado, tensiones Residuales de Tracción pueden ser suficientes para causar Corrosión bajo Tensión en un material particular con o sin la presencia de Tensiones adicionales.
5) **Pandeo.** Las Tensiones Residuales reducen significativamente la resistencia al Pandeo de columnas fabricadas por Soldadura.
6) **Creep.** Tiene poco o ningún efecto.
7) **Fisuración de Soldadura.** Las Tensiones Residuales pueden influir en distintos tipos de fisuración de Soldadura. Fisuración en caliente durante la solidificación. Fisuración por Hidrógeno en zonas duras de la ZAC, desgarre Laminar, fisuración por recalentamiento.
8) **Distorsión.** En estructuras esbeltas, las tensiones residuales aunque pequeñas pueden producir distorsiones importantes durante el posterior mecanizado.

5.1.2 MODIFICACION DE LA ESTRUCTURA METALOGRÁFICA. Metalurgia de la Soldadura. Cap. V. Daniel Seferian. Ed. TECNOS. Madrid.1962.

La mayoría de los aceros modernos obtienen sus propiedades mecánicas por intermedio de procesos termomecánicos como Forja, laminación, extrusión, fundición o Tratamiento Térmico los que realizados correctamente proporcionan una microestructura óptima para soportar las solicitaciones mecánicas.
Cuando a esta estructura se le aplica el ciclo térmico de la Soldadura se forman dos zonas perfectamente diferenciadas
.- Metal fundido con o sin presencia de metal de aporte.
.- Zona afectada por el calor (ZAC).Esta zona esta afectada estructuralmente sin haber llegado a la fusión.

Estas dos zonas ya no tienen la Estructura óptima original del Material Base y por lo tanto puede considerarse a este cambio estructural un efecto Indeseable del ciclo térmico de Soldadura.
Esto puede controlarse parcialmente por dos medios.

5.1.2 .1 Modificando el Ciclo Térmico de la Soldadura.
.- Actuando sobre las variables del proceso de Soldadura. El Calor Aportado (Heat Input). Su aplicación tiene limitaciones.
.- Por medio del Precalentamiento del Material Base.

5.1.2.2 Realizando un ciclo térmico luego de la Soldadura con Temperaturas y velocidades de calentamiento / enfriamiento controlado. A este ciclo se le llama TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA. (TTPS) (PWHT) y conjuntamente con el Precalentamiento es la forma idónea para evitar o corregir los Efectos Indeseables de la Soldadura.

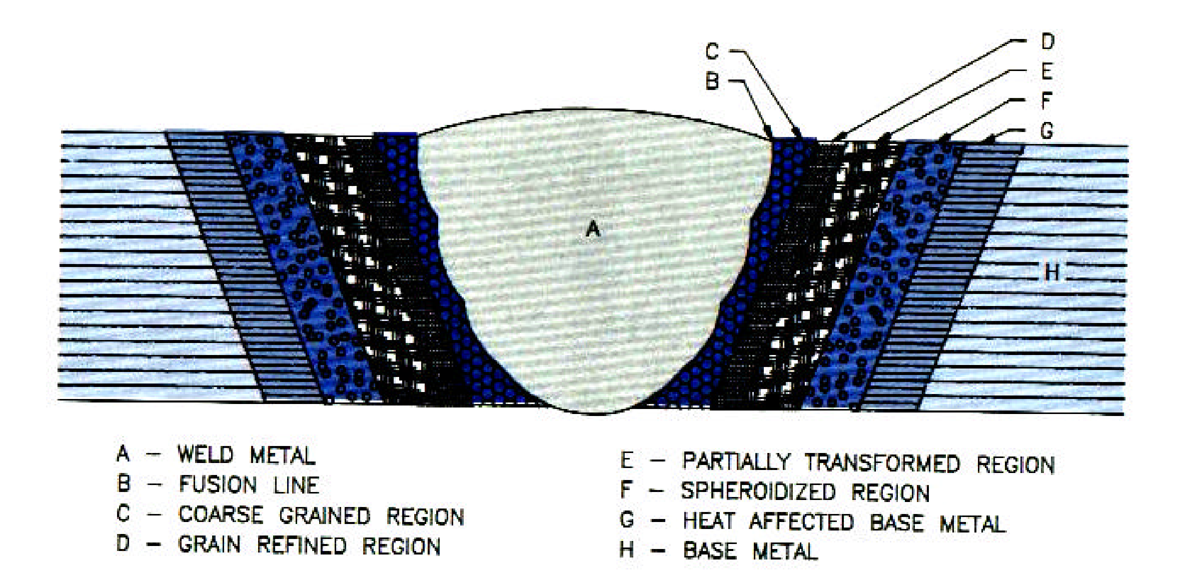


Fig. 12. Esquema de la Microestructura de una Soldadura de un acero micro aleado. Welding Journal Mayo 1991. Pág. 57.

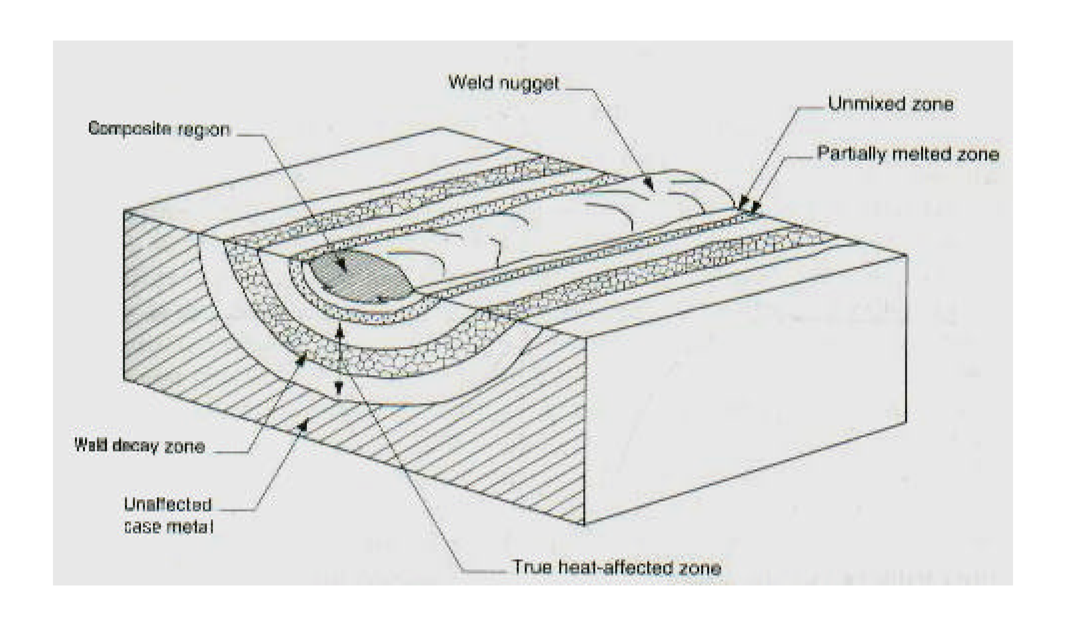


Fig.13. Esquema de la Microestructura de una Soldadura. Principles and Prevention of Corrosion. Denny A. Jones. 1992. Pág. 309.

5.1.3 ABSORCIÓN DE GASES POR LA SOLDADURA. Metalurgia de la Soldadura. Cap. V. Daniel Seferian. Ed. TECNOS. Madrid.1962.

Uno de los Problemas más importantes a tener en cuenta cuando se estudian los Efectos Indeseables del proceso de Soldadura es la Absorción de Gases por el Metal Fundido.
Cualquiera que sea el procedimiento de Fusión, en el acero líquido se fijan cantidades mas o menos importantes de los gases del aire (Oxigeno y Nitrógeno) y de los productos de descomposición del revestimiento, principalmente Hidrógeno procedente de la humedad o del agua de cristalización de ciertas substancias químicas.

.- El Oxígeno puede presentarse disuelto o formando oxido de hierro o combinado con otros óxidos. En estado disuelto puede influir sobre las propiedades mecánicas de la Solución Sólida Ferrita; en estado de óxido influye por la presencia de inclusiones en la tenacidad y estricción del metal de soldadura.

.- El Nitrógeno origina al nitruro de hierro Fe_4N en forma de agujas que también influye en la tenacidad. Cuando el Nitrógeno se encuentra disuelto produce el envejecimiento del acero con la correspondiente falta de plasticidad.

.- Pero el verdadero problema y mucho más grave es que durante la Soldadura el acero también absorbe Hidrógeno, lo mismo que absorbe oxígeno y nitrógeno. Las Soldaduras oxiacetilénicas contienen muy poco hidrógeno (2 a 3 cm^3 por 100g de metal); La concentración de hidrógeno en las soldaduras por arco es, por el contrario mucho mas importante y puede llegar a alcanzar el límite de solubilidad de este gas en el metal líquido (28 cm^3 por 100g de metal) según sea la naturaleza del revestimiento. El hidrógeno es la causa de la formación de Microfisuras, sopladuras y es el formador de los Fish-eyes.

6. Resumen de las razones para realizar Tratamientos Térmicos de Soldadura

CON TODO LO QUE PUEDE SALIR MAL DURANTE UNA SOLDADURA, UN JUICIOSO USO DEL TRATAMIENTO TERMICO PUEDE INFLUIR MÁS QUE CUALQUIER OTRO FACTOR EN LA OBTENCION DEL ÉXITO

TRATAMIENTOS USUALES DE SOLDADURA

ANTES DE LA SOLDADURA	DURANTE LA SOLDADURA	DESPUES DE LA SOLDADURA
DESHIDROGENADO “HIDROGEN BAKE OUT”	PRECALENTAMIENTO “PREHEAT”	TRATAMIENTO TERMICO POST – SOLDADURA (T.T.P.S.) “POSTWELD HEAT TREATMENT” (P.W.H.T.)
¿POR QUÉ? Los equipos que han estado en presencia de Hidrogeno atómico son susceptibles de fisurarse durante su reparación por soldadura. La causa es la presencia de Hidrogeno atómico en el material base. Este gas, en forma atómica, penetra en el acero causando fisuración, porosidad, empolladuras y perdida de ductilidad. Con el paso del tiempo, el Hidrógeno atómico difunde en el retículo cristalino del acero recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando ampollas. Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun, puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC). Un caso particular es la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S), que acelera la entrada de Hidrógeno y aumenta la actividad de hidrogeno atómico. El resultado es a veces mal llamado Corrosión Bajo Tensión por ácido sulfhídrico porque en realidad es una forma de HIC. La Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE), norma MR -01-75, Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for oíl field equipment, establece que la dureza no debe superar los RC 22. Las temperaturas corrientes de Deshidrogenado no están tan acotadas como las de T.T.P.S. y suelen variar entre 150ºC y 450ºC. Este Tratamiento permite al Hidrógeno atómico difundir fuera del material.	¿POR QUÉ? Hay seis razones para precalentar 1. El precalentamiento es la principal defensa contra la Fisuración Inducida por Hidrogeno (HIC) permitiendo a este difundir fuera del metal de soldadura. 2. Disminuye la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura y de la ZAC, el resultado es una microestructura mas dúctil y resistente a la fisuración. 3. Disminuye algo las Tensiones Residuales al reducir la diferencia de temperatura entre el Metal de Soldadura y el material base minimizando la contracción. 4. Mantiene al acero a una temperatura superior a aquella por debajo de la cual ocurre fractura frágil. 5. Compensa las perdidas de calor en secciones gruesas de acero y especialmente en aleaciones de alta conductividad térmica como cobre o aluminio evitando fallas por falta de fusión del Material Base. 6. Reduce la porosidad debida a la presencia de humedad	¿POR QUÉ? Hay cinco razones para T.T.P.S. (P.W.H.T.) 1) Disminuye la dureza de la ZAC, metal de soldadura y material base. El resultado es una microestructura mas dúctil y resistente a la fisuración. 2) Aumenta la resistencia a la corrosión y a la fisuración por Corrosión bajo Tensión (SCC). 3) Al reducir las tensiones residuales aumenta la estabilidad dimensional de estructuras soldadas y mecanizadas. 4) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Tenacidad del material., por disminución de la Triaxialidad. 5) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Resistencia a la Fatiga
		POSTCALENTAMIENTO
		Este tipo de T.T.P.S. es realmente una prolongación del precalentamiento y esta dirigido a remover el hidrogeno que pudiese quedar luego de la soldadura. Se suele utilizar en reparaciones cuando el TTPS es impráctico o inseguro para la instalación. Ver National Board I.C.

SECCION III.

6 DESHIDROGENADO

El único calentamiento que puede realizarse antes de la Soldadura es el llamado **Deshidrogenado** (baking, ó Bake - out en Ingles). Tiene como objetivo remover del material a ser soldado el hidrógeno que pudiese haber quedado debido al efecto contaminante, en servicio, de substancias que generan hidrógeno atómico ya que los equipos que han estado en presencia de Hidrógeno atómico son susceptibles de fisurarse durante su reparación por Soldadura. La causa es la presencia de Hidrogeno atómico en el material base, y es imperativo eliminarlo antes de soldar.

Este gas, en forma atómica, penetra en el acero causando Fisuración, porosidad, empolladuras y pérdida de ductilidad. Con el paso del tiempo, el Hidrógeno atómico difunde en el retículo cristalino del acero recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando excepcionalmente ampollas de hasta un (1) metro de diámetro en chapas relativamente finas (19mm). Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).

- La fragilización por Hidrogeno de aceros Ferriticos ocurre solo a bajas Temperaturas, cercanas a la temperatura ambiente. Es posible evitar la Fisuración en microestructuras duras manteniéndolas un tiempo a suficientemente alta Temperatura, ya sea para permitir al hidrogeno difundir fuera del material y/o para que la microestructura se ablande por revenido. Este principio se emplea en soldaduras multipasadas y en TTPS.

- Otro problema que puede producir el Hidrogeno es a alta temperatura, se denomina Ataque por hidrogeno (Hydrogen Attack) y ocurre cuando el hidrogeno atómico reacciona con el carbono de los carburos produciendo burbujas de metano. Las consecuencias son, pérdida de resistencia mecánica por descarburación del acero y la generación de sopladuras o poros con Metano. Este problema puede ocurrir en Servicio a altas temperaturas de equipos de procesamiento de petróleo o cuando se deshidrogena a Temperaturas demasiado elevadas (>250ºC).

Fuentes usuales de Hidrógeno atómico son:

- Reacciones de diversos procesos químicos
- Adición de Hidrógeno con propósitos varios
- Presencia de Hidrógeno atómico en el producto.
- Aplicación de recubrimientos Electrolíticos
- Procesos de Limpieza Química de óxidos. (Pickling)
- Protección Catódica
- Eventual descomposición de la Humedad.

Un caso particular es la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S), que acelera la entrada de Hidrógeno y aumenta la actividad de Hidrogeno atómico. El resultado es a veces mal llamado Corrosión Bajo Tensión por ácido sulfhídrico porque en realidad es una forma de HIC.
La Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE), norma MR-01-75, "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for oíl field equipment", establece que para evitar HIC la dureza tanto del Material Base como el material de Aporte y ZAC no debe superar los RC 22.

TEMPERATURAS DE DESHIDROGENADO:

Las temperaturas corrientes de Deshidrogenado no están tan acotadas como las de T.T.P.S. y suelen variar entre 150ºC y 450ºC aunque como veremos mas adelante las temperaturas mas apropiadas rondan los 200ºC – 250ºC. Un incremento en la Temperatura por encima de la Temperatura ambiente incrementa la velocidad de difusión del hidrógeno y de esa manera se acelera su remoción de la soldadura. Este efecto es particularmente marcado en el rango de 20ºC a 150ºC. Por encima de los 150ºC la velocidad de difusión sigue aumentando pero a un ritmo menor. Fig 14. Para elegir la Temperatura de Deshidrogenado hay que tener en cuenta los siguientes factores:

1) Debe ser superior a 200ºC ya que por encima de esa temperatura todo el Hidrógeno es atómico, condición necesaria para su difusión

2) El aumento de la velocidad de difusión por encima de los 150ºC no es tan importante como por debajo de 150ºC

3) Si bien existe la tentación de realizar deshidrogenados a temperaturas superiores para maximizar la velocidad de difusión (450ºC a 650ºC) debe tenerse en cuenta que a temperaturas superiores a 200ºC /250ºC el hidrogeno atómico puede reaccionar con los carburos (especialmente con carburos simples de Hierro y menos probablemente con carburos de Cromo) con el doble perjuicio de decarburar el acero disminuyendo su resistencia mecánica y de formar burbujas de metano (CH_4). Este tipo de falla se lo denomina Ataque por Hidrogeno (Hydrogen Attack) y también suele ocurrir en servicio a alta temperatura de equipos de Refinerías de Petróleo.

4) La solubilidad del Hidrogeno en el hierro aumenta con la temperatura y por lo tanto a altas temperaturas el hierro disuelve en equilibrio mas Hidrogeno que a bajas temperaturas de esa manera quedaría mas hidrogeno en la red de hierro que realizando el deshidrogenado a mas bajas temperaturas, además a altas temperaturas la fuerza impulsora (debida a la sobresaturación) para expulsar al hidrogeno es menor. Este factor no ha sido comprobado experimentalmente por lo que la formación de Metano por Ataque por Hidrogeno (Hydrogen Attack) es el mas tenido en cuenta.

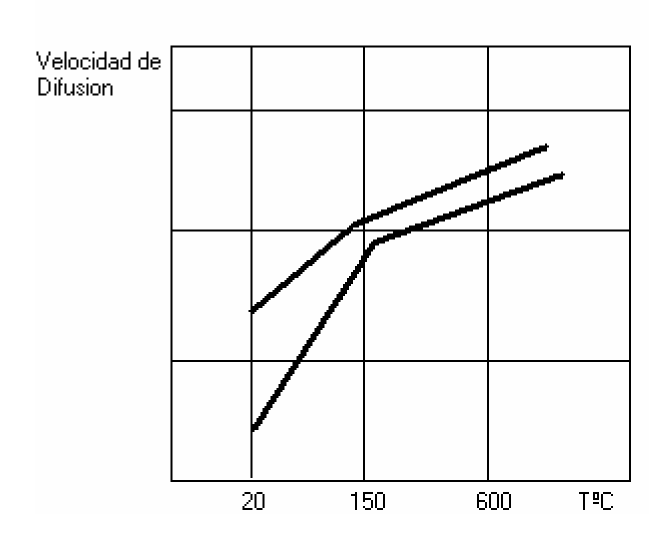


Fig.14 La Velocidad de difusión del Hidrógeno en acero Ferritico disminuye por encima de los 150ºC

TIEMPOS DE DESHIDROGENADO

Este tema está tratado exhaustivamente en “WELDING STEELS WITHOUT HIDROGEN CRACKING” editada por “THE WELDING INSTITUTE” donde además hay una copiosa bibliografía.

La remoción del hidrógeno de los metales esta controlada por el fenómeno de Difusión que obedece a la segunda ley de Fick descripta matemáticamente por:

$$dC/dt = D\,(d^2C/dx^2)$$

donde C es la concentración del elemento que difunde, en nuestro caso H, t es el tiempo, x es la distancia que se mueven los átomos de H y D es el coeficiente de Difusión que depende del radio atómico del material que difunde (H), el tipo de mecanismo de Difusión, las características del medio(Acero o el material que corresponda) donde se realiza la Difusión, por ejemplo temperatura de fusión, estructura cristalográfica, cantidad y calidad de los aleantes, y Fundamentalmente la Temperatura (A mayor Temperatura mayor movilidad atómica y mayor coeficiente de Difusión.
Esta ley describe la relación entre la concentración de Hidrógeno en el Acero, el tiempo y su distribución espacial. Es interesante reconocer que este mismo tipo de ecuación describe el flujo de calor y la distribución de Temperaturas en un sólido que se enfría.

La Fig 5.1 muestra el porcentaje de la concentración original de Hidrógeno que queda en el centro del material para varias configuraciones geométricas a medida que el tiempo t avanza.
El tiempo aparece en la expresión adimensional Dt/L^2 de la absisa donde D es el coeficiente de difusión para la temperatura y material en consideración y L es la dimensión determinante del sólido que en este caso es el semiespesor de una chapa, barra o cubo y el radio de formas cilíndricas. Esta expresión debe ser adimensional por lo que como D esta expresada en $cm^2/seg.^{-1}$ debe cuidarse que las unidades de t y L sean las apropiadas.
Es importante establecer que en este tema todas las curvas de cálculo mostrarán siempre el porcentaje del contenido original remanente de Hidrógeno, por lo tanto es importante también conocer de antemano el contenido de Hidrógeno que posee en el material antes del tratamiento de deshidrogenado y cual es el máximo contenido de hidrogeno aceptable sin riesgo de fisuración.

Para ejemplificar:
Si un proceso de soldadura, para un espesor de 40mm, deposita un material con 10 ml /100g de material depositado (electrodos de bajo Hidrógeno secados a 100/150ºC) y el nivel máximo aceptable es 5ml/100g significa que debemos reducir el contenido original de Hidrógeno en solo un 50%, los tiempos necesarios para esta reducción a una temperatura de deshidrogenado de 250ºC serán del orden de 8 horas. Si quisiésemos remover el 75% del Hidrógeno este tiempo crecería a aproximadamente 17 horas.

Es importante limitar la cantidad de hidrógeno a remover por que si eligiésemos arbitrariamente una reducción del 100% por simple afán perfeccionista, por ejemplo una chapa de acero al carbono de 40 mm de espesor (L=20) con una temperatura de tratamiento de 200ºC el cálculo teórico nos da un tiempo de un año o mas!
Para entender esto conviene recordar lo que dijimos acerca de que la evolución del contenido de hidrógeno es similar a la evolución de la temperatura de un sólido que se enfría, a medida que el sólido se acerca a la temperatura ambiente la velocidad de enfriamiento se hace menor y la curva de temperatura se hace asintótica al eje de los tiempos mostrando que la temperatura del sólido en teoría será exactamente la temperatura ambiente para un tiempo infinito.
Por lo anterior se acepta no disminuir el Hidrógeno a valores demasiado pequeños solo por que los tiempos de Tratamiento serían excesivamente largos.
En la práctica este problema se resuelve de la siguiente manera:
1º) Se trata de depositar material con bajos valores de hidrógeno, por ejemplo electrodos revestidos de bajo hidrógeno resecados por lo menos a 150ºC(10-12 ml/100g) o mejor aún resecados a 400/500ºC (5 ml/100g) de esta manera ya partimos de valores bajos.

2º) Se limita el mínimo valor de Hidrógeno aceptable sin riesgos de fisuración a niveles no menores a 2ml/100g de material depositado.

3º) De esta manera con la diferencia entre los dos valore anteriores se calcula cual es el porcentaje necesario de remoción que raramente es mayor que un 50%

Tiempo y temperatura de tratamiento	Porcentaje remanente de hidrógeno					
	Chapa			Cilindro		
	Optimista	Mas probable	Pesimista	Optimista	Mas probable	Pesimista
5h a 150ºC	80	90	>90	66	82	90
336h a 20ºC	80	90	>90	66	82	>90
6h a 650ºC	81	88	>90	64	75	83
18h a 650ºC	51	64	75	21	40	57
5h a 150 ºC +6h a 650ºC		79			63	
5h a 150 ºC +18h a 650ºC		58			33	

Tabla V. Estimación del porcentaje del original de Hidrógeno remanente en el centro de una soldadura de L=20 mm después de varios tipos de Tratamiento de Deshidrogenado.

Como conclusión, el cálculo exacto debe hacerse con las curvas originadas por un trabajo de Russell obtenidas de la publicación anteriormente mencionada.

Los valores de tiempo para tratamientos a temperaturas del orden de 250ºC de chapas con espesores de 40mm para una reducción del contenido de Hidrógeno del 50% es de alrededor de 8 horas, esto se comenta por que la mayoría de las veces los tratamientos de deshidrogenado se realizan a las temperaturas correctas pero con tiempos menores a los prescriptos por las curvas mencionadas. Lo que ocurre es que los tiempos suelen ser demasiados largos para los apuros de la obra y en la mayoría de los casos una reducción aunque sea solo parcial del hidrógeno parece ser suficiente.
A veces se realiza un deshidrogenado de tres o cuatro horas a bajas temperaturas (250ºC) para remover parte del hidrógeno y luego un deshidrogenado a 600ºC. Esto se realiza de esta manera ya que a alta temperatura (600ºC) podría formarse algo de metano (Ataque por Hidrógeno) si no le hubiéramos retirado algo de Hidrógeno a mas baja temperatura.

6.1 FISURACIÓN INDUCIDA POR HIDRÓGENO. (HIC).

Este tipo de fisuración tiene lugar si se presentan simultáneamente las siguientes condiciones:

.- Una Concentración de Hidrógeno Crítica
.- Tensiones de Tracción Elevadas
.- Una Microestructura Susceptible
.- Una Temperatura entre -100ºC y + 200ºC

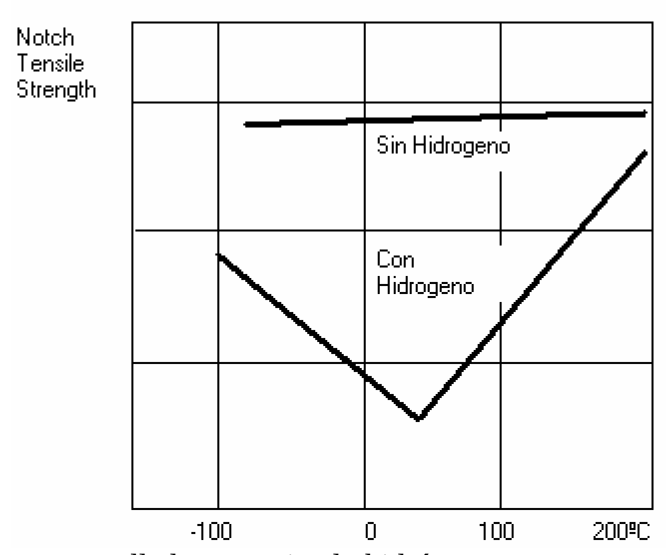


Fig. 15 La resistencia de un acero entallado conteniendo hidrógeno pasa por un mínimo cerca de Temperatura ambiente.

6.1.1 FORMACION

El hidrógeno atómico debe considerarse un verdadero veneno de los Aceros Ferríticos (Los Inoxidables Austeniticos, serie 300 no sufren HIC, salvo cuando están deformados en frío). Puede difundir a través de la Estructura Cristalina del Acero debido a su pequeño diámetro atómico recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando ampollas a veces de hasta un (1) metro de diámetro en chapas relativamente finas (19mm). Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).

Esta recombinación acumula moléculas de hidrógeno en forma gaseosa desarrollando presiones suficientemente altas para romper enlaces atómicos y generar fisuras si la microestructura no es plástica.
Las presiones generadas se calculan teóricamente (en forma aproximada) y llegan a valores de 10^5(cien mil) Atm. En el caso del Nitrógeno estos mismos cálculos dan valores de 4 Atm.
De lo anterior surge la peligrosidad del Hidrógeno frente al Nitrógeno o cualquier otro gas. Cantidades tan pequeñas como 0,0001 % (10^{-4}) en peso pueden producir fisuras en el acero.

6.1.2 ACEROS RESISTENTES A LA PENETRACIÓN DE HIDRÓGENO

Dentro de los materiales mas usados en la industria petroquímica se encuentran los Aceros Resistentes a la Penetración de Hidrógeno, aleados al CrMo lo que le proporciona al acero las siguientes propiedades:

En general estos aceros deben trabajar a altas temperaturas y por lo tanto tienen propiedades refractarias.
Deben resistir la Corrosión a Altas Temperaturas, el Creep, La Fatiga Térmica y por último deben tener Resistencia a la Penetración de Hidrógeno, propiedad que logran gracias a la película de oxido de Cromo impermeable a este tipo de contaminante.
Por otra parte como el Carburo de Cr es menos fácil de disociar que el CFe_3 no se descompone en C y Cr. Pues el C podría asociarse con el Hidrógeno para formar Metano y de esta manera se produciría poros y descarburación del acero (Hydrogen Attack). La presencia de Molibdeno (Mo) además de mejorar la resistencia al Creep es para evitar la fragilidad de Revenido (una forma de fragilidad que tiene lugar cuando un acero templado es calentado o cruza lentamente el rango de temperaturas de 500 / 550°C), Tratamiento Térmico utilizado como TTPS de estos aceros para disminuir la dureza de la ZAC y metal de aporte.

6.1.3 MORFOLOGIA: Las fisuras por HIC son en general transgranulares y se inician luego de finalizada la soldadura con retardos de hasta dos semanas, por esa razón a este tipo de fisuración también se lo llama fisuración retardada por hidrógeno.

Nota Importante:

“Estas fisuras pueden no ser detectadas fácilmente, pueden estar en la ZAC, ser del tipo "Under Bead " y pueden en el caso de ser "Toe Crack" no llegar a la superficie. Esto significa que pueden no ser detectables por ensayos de tintas penetrantes o partículas magnéticas.
Dependiendo de su orientación pueden no ser visibles por radiografía y pueden escapar a la detección por US aunque esta es quizá la mejor técnica para detectar fisuras de este tipo.
Si estas fisuras no se detectan es altamente probable que fallen en servicio, de ahí la necesidad de prevenir evitando su formación”

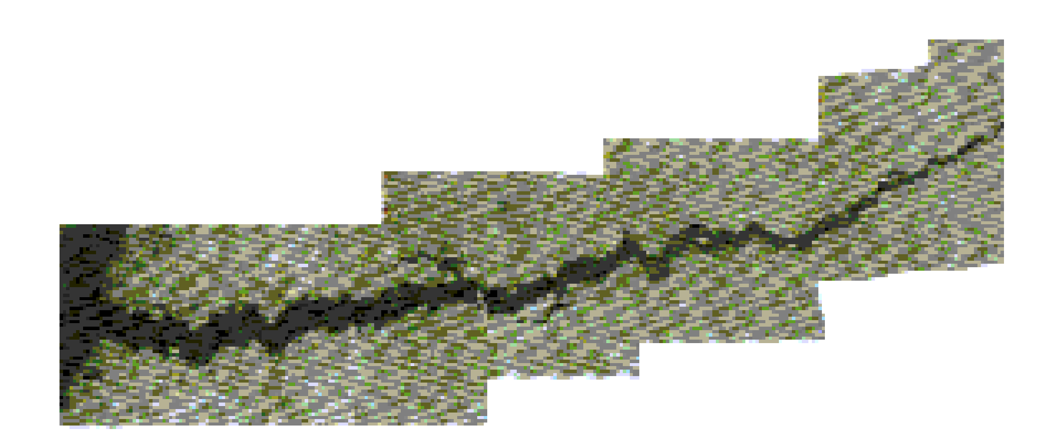


Fig.16. Falla en un acero inoxidable Tipo 301 deformado plásticamente en frío debida a HIC

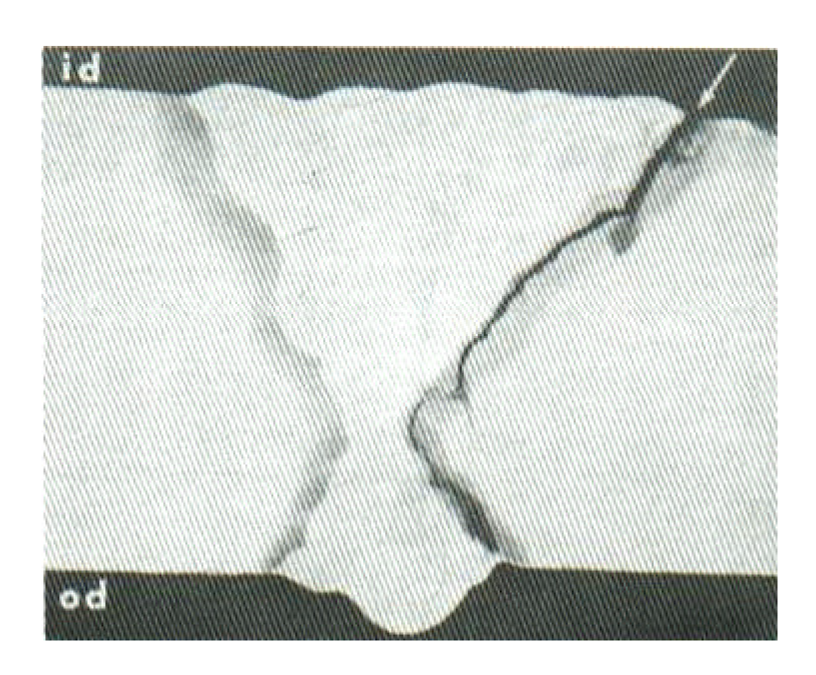


Fig.17. Falla por HIC (Under-Bead Cracking) en la ZAC con estructura Martensítica de un acero al Carbono de un tanque de almacenamiento de Ácido Fluorhídrico (HF)

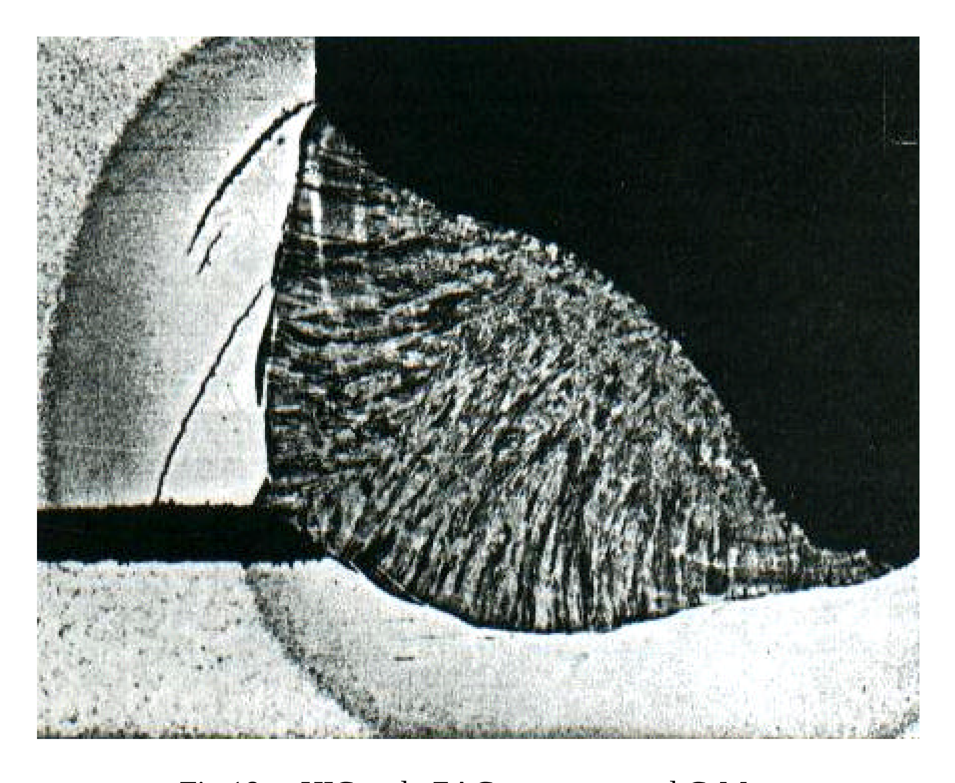


Fig.18. HIC en la ZAC en un acero al C-Mn

6.1.4 RANGO DE OCURRENCIA DE HIC:

- La fisuración por hidrógeno ocurre solo con microestructuras susceptibles. En aceros al C o al CMn una razonable indicación de la presencia de tales estructuras es cuando la dureza supera los 350HV (331HB) (35RC) que corresponde a la presencia de Martensita y a veces de Bainita. (Welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge.U.K.)
  Durante el enfriamiento del acero desde el estado Austenítico, el rango de temperaturas de formación de dichas estructuras se extiende desde los 550ºC hasta los 200ºC, dependiendo de su composición química. Se encontró que existe una correlación entre la susceptibilidad a la fisuración y la velocidad de enfriamiento a 300ºC. Por esta razón temperaturas de precalentamiento de 300ºC tienen un efecto muy marcado en la velocidad de enfriamiento, y por lo tanto en la tendencia a la fisuración.

- Por su parte La Asociación Americana de Ingenieros de Corrosión NACE, para el caso particular de Fisuración Inducida por ácido sulfhídrico H_2S, un tipo de HIC muy común en la industria del gas y el petróleo recomienda en la norma MR 0175 "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials in Oilfield Equipment"que la dureza no supere los 22 HRc o sea unos 238 HB.

- Esta norma también especifica en 5.3.1.1 que estos valores de dureza se obtienen en la condición "As welded" o sea sin ningún Tratamiento Térmico post Soldadura de ablandamiento para materiales tubulares con una resistencia a la fluencia inferior a 360 MPa (52Ksi) y aceros para recipientes a presión clasificados como PNo1, Gr1 y 2 de ASME 9. Esto significa que si estamos soldando aceros con estos valores de resistencia a la fluencia o menores es altamente probable que la dureza en el cordón de soldadura y ZAC no supere los 22HRc, por lo tanto el control de dureza puede hacerse solo parcialmente para verificar esta situación y obviar el costoso Tratamiento térmico Post soldadura.

- Este problema se encuentra en pozos de petróleo o gas profundos contaminados con H_2S y durante el procesamiento de dichos productos

- Se encontró que aceros tratados térmicamente con 560 MPa (55Kg/mm2) de límite de fluencia, sé fisuran en muy poco tiempo presencia de H_2S. Esto puede solucionarse incrementando la Temperatura de Servicio hasta valores de por lo menos 150ºC o incrementando el PH del producto por encima de 6.

La HIC o Fisuración Retardada por Hidrógeno se produce luego de finalizada la soldadura y a temperatura ambiente. Como ya dijimos ocurre entre -100ºC y +200ºC.

.- No ocurre a menos de -100ºC por que la difusión es insuficiente para que los átomos de Hidrógeno difundan dentro del material y se recombinen a Hidrógeno molecular y produzcan HIC.

.- No ocurre a más de 200ºC por que a temperaturas superiores a 200ºC todo el hidrogeno se encuentra en estado atómico sin posibilidades de formar moléculas H_2 y la difusión es suficientemente elevada para una masiva migración de átomos a través de la superficie hacia la atmósfera.

.- En el caso que se desee Deshidrogenar un material que se sospecha pueda tener hidrógeno atómico antes de su reparación por Soldadura se utilizan temperaturas del orden de 200ºC / 250ºC y no mayores. (Ver Temperaturas de Deshidrogenado)

SECCION IV

7. PRECALENTAMIENTO

Consiste en calentar el Material Base antes y durante la soldadura manteniendo la Temperatura del mismo entre un valor mínimo (Temperatura de Precalentamiento) y uno máximo (Temperatura entre pasadas) por alguna o varias de las siguientes razones.

1.- El precalentamiento es la principal defensa contra la Fisuración Inducida por Hidrogeno (HIC) permitiendo a este difundir fuera del metal de soldadura.

2.- Disminuye la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura y de la ZAC, el resultado es una microestructura más dúctil y resistente a la fisuración.

3.- Disminuye algo las Tensiones Residuales al reducir la diferencia de temperatura entre el Metal de Soldadura y el material base minimizando la contracción.

4.- Mantiene al acero a una temperatura superior a aquella por debajo de la cual ocurre fractura frágil.

5.- Compensa las perdidas de calor en secciones gruesas de acero y especialmente en aleaciones de alta conductividad térmica como cobre o aluminio evitando fallas por falta de fusión del Material Base.

6.- Reduce la porosidad debida a la presencia de humedad

1) Sobre el efecto Deshidrogenante del Precalentamiento y en particular su influencia en la HIC vale todo lo comentado en el capítulo de Deshidrogenado y conviene una relectura profunda del mismo. Es importante no olvidar fuentes obvias de Hidrógeno como puede ser humedad, Lubricantes, o Hidrocarburos en la junta soldada o en el alambre de aporte como así también herrumbre u “oxido” puede ser fuente de Hidrógeno debido a que los mal llamados “óxidos” realmente son hidróxidos de Hierro $Fe(OH)_3$

2) El Precalentamiento (PC) disminuye la velocidad de enfriamiento del metal soldado evitando la formación de constituyentes de temple duros tales como Martensita y a veces Bainita.

La capacidad de adquirir temple por un acero depende de su %C y de los elementos de aleación. Él %C, además de aumentar la Templabilidad como un elemento de aleación mas, define la máxima dureza que puede tomar el acero por un temple completo y los elementos de aleación definen la velocidad de enfriamiento desde el rango austenítico necesaria para poder lograrlo.
Cuanto mayor sea el % C mayor será la dureza posible a obtener y cuanto mayor sea la cantidad de aleantes menor será la velocidad de enfriamiento necesaria para obtenerla.
Esto significa que ambos, %C y % de aleantes disminuyen la Soldabilidad de un acero pues aumentan su Templabilidad.
Además de su inherente fragilidad estas estructuras duras son más susceptibles a la Fisuración por hidrógeno (HIC) y a la Corrosión bajo Tensión (SCC)

La influencia del Precalentamiento acerca de su habilidad para evitar la formación de estructuras duras se puede observar claramente en el caso de aceros aleados, por ejemplo el acero SA-335 Gr. P5 con 5% de Cr y 0,5% de Mo. Si este acero es soldado sin precalentamiento presenta una ZAC totalmente Martensitica con durezas de aproximadamente HB 450.
Si en cambio la soldadura se realiza con precalentamiento de 300ºC la cantidad de Martensita en la ZAC es solo del 50% y la dureza es algo superior a 300HB.

Como la dureza requerida en este acero cuando se usa en la industria Petroquímica (ASME B 31.3) Parag. 331.1.7 y tabla 331.1.1 debe ser como máximo 241HB para evitar SCC en la ZAC y/o metal de soldadura se hace imprescindible realizar un TTPS para revenir ese 50% de Martensita remanente luego de la soldadura con PC y así disminuir la dureza a valores inferiores a 241HB.
Cuando se sueldan aceros al CrMo si el PC no se hace correctamente (temperatura insuficiente) y no disminuye la dureza lo previsto, luego el TTPS especificado (pensado para un PC correcto) podría no ser suficiente en tiempo o temperatura de permanencia teniéndose que repetir el TTPS a cargo del responsable del PC con los conflictos correspondientes.
Por esto se debe realizar el PC a la temperatura establecida en el Procedimiento de Soldadura, y no a menos temperatura, suponiendo que luego el TTPS "compensa" las deficiencias de Temperatura de PC, por otra parte muy comunes, debido a que una temperatura de 300ºC no es fácil de mantener y suele ser incómoda para el soldador.

Conviene añadir que si el precalentamiento no se hizo a la temperatura establecida en el procedimiento de Soldadura pueden aparecer fisuras durante el enfriamiento que ningún TTPS podrá reparar. Además no conviene esperar toda la disminución de dureza a cargo del TTPS olvidándonos del control del PC pues el inspector podría requerir Ensayos 100% para detectar posibles fisuras nuevamente luego del TTPS aunque la dureza sea la requerida si sospecha que el PC no se hizo correctamente.

3) El PC aunque en menor medida que el TTPS también reduce algo las tensiones residuales. Por ejemplo un PC de 200ºC reduce las tensiones residuales en aproximadamente un 15% a 20%.

4) Los principales factores que influyen en la transición de fractura dúctil a fractura frágil en metales con una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc) [Aceros Ferriticos], son la Triaxialidad, la Velocidad de aplicación de la Carga y la Temperatura. La transición frágil / dúctil puede ser explicada en términos de la resistencia relativa al corte y al clivaje y como cambian ellas con la Temperatura. Fig.14. Ver Mechanical Metallurgy. George E. Dieter. McGraw-Hill.

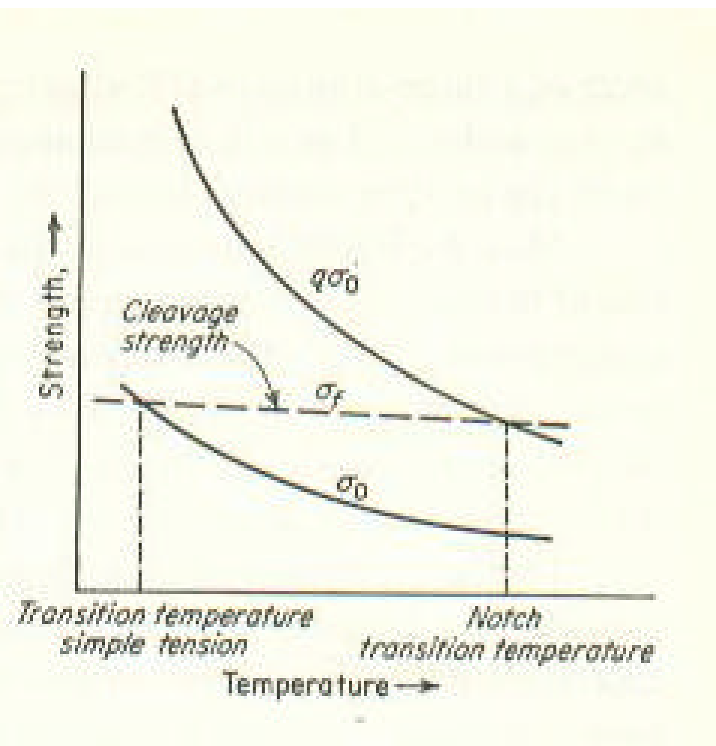


Fig 19. Resistencia relativa al Corte y al Clivaje de especimenes con y sin entalla. “Metalurgia Mecanica.Dieter”

En concreto, cuanto mas baja sea la temperatura del material su plasticidad será menor y un precalentamiento influirá en la posibilidad de fisuración durante la Soldadura.

5) La alta conductividad térmica de algunos materiales base como Cobre y / o Aluminio (y aun en aceros de alto espesor) hace difícil su fusión por lo que se producen faltas de fusión que son causa de rechazo. Las Temperaturas de PC en cobre para 19 mm de espesor son inusualmente altas comparadas con las temperaturas de PC del acero. En estos casos se suele precalentar a 400 / 600 ºC y no menos.

6) La presencia de humedad en el material base es inaceptable por la posible presencia de poros y aun fisuración por HIC. En estos casos, cuando se prevea la posibilidad de condensación por un clima muy húmedo o mañanas con rocío se debe precalentar a 90ºC / 100ºC para evaporar la humedad. Por debajo de 0ºC no se debe soldar.

7.1 ELECCION DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

La capacidad de adquirir temple por un acero depende de su %C y de los elementos de aleación. Él %C define la máxima dureza que puede tomar el acero por un temple completo y los elementos de aleación (Carbono incluido) definen la velocidad de enfriamiento desde el rango Austenítico necesaria para poder lograrlo.
Cuanto mayor sea el % C mayor será la dureza posible a obtener y cuanto mayor sea la cantidad de aleantes menor será la **Velocidad de Enfriamiento** necesaria para obtenerla.
Esto significa que ambos, %C y % de Aleantes disminuyen la Soldabilidad de un acero pues aumentan su Templabilidad.
Concretamente el PC se realiza con el objeto de disminuir la velocidad de enfriamiento de la ZAC y del metal de Soldadura.

7.2 CARBONO EQUIVALENTE. (Ver IIW DOC IX – 1230- 82)

Se han propuesto varias formulas que permiten cuantificar la Soldabilidad de un acero. Estas reducen los valores de Composición Química a un solo número que se denomina Carbono Equivalente (CE).

	Fuente	Fórmula	
1	IIW	CE=C+Mn/6+Mo/5+Ni/15+Cr/5+V/5+Cu/15	C= 0,18
2	WES	CE=C+Mn/6+Si/24+Mo/29+V/14	
3	Dearden-O´Neill	CE=C+Mn/6+Mo/4+Ni/15+Cr/5	
4	Kihara-Suzuki-Tamura	CE=C+Mn/6+M0/4+Ni/40+Cr/5+V/14+Si/24	
5	Stout	CE=C+Mn/6+Mo/10+Ni/20+Cr/10+Cu/40	
6	Winterton	CE=C+Mn/6+Mo/50+Ni/20+V/10+Cu/40	
7	Ito-Bessyo "PCM"	CE =C+Mn/20+Mo/15+Ni/60+Cr/20+V/10+Cu/20+Si/30+5B+H/60+At/600 A=1 Junta libre A=2 Junta Embridada t = Espesor en mm H = cm^3/100g de metal depositado (Básicos:5 – Celulósico: 20) Tpc(ºC)= 1440PCM-392	%C=0,17
8	Bradstreat	CE=C+Mn/20+Mo/10+Ni/15+Cr/10+V/10	
9	Lorenz-Düren	CE=C+Si/26+Mn/19+Cu/22+Cr/12+Ni/38+Mo/13+V/7	
10	Koch-Bersch	CE = C + (Mn+Mo+Ni+Cr+V+Cu+Si) / 20	
11	Graville	CE = C + Mn/16+Mo/7+Cr/23+Ni/50+ Nb/8+V/9+1/12 log H_2	
12	Yurioka-Ohshita "CEN"	CE =C +A(C) (Si/24+ Mn/6+Cu/15+Ni/20+ (Cr +Mo + Nb +V)/5+ 5B A(C)= 0,75+0,25tanh [20 (C-0,12)]	Para todos los %C

Cualquiera de estas formulas debe ser capaz de establecer lo mas exactamente posible la Temperatura de PC necesaria para evitar fisuración o durezas inaceptables en la ZAC.
Con la ayuda de estas formulas y ensayos de fisuración se confeccionan tablas de Temperaturas de PC, las cuales se encuentran en los códigos de fabricación.
Debido a que el CE se calcula en base a la Composic ión Química del material y no tiene en cuenta factores como:

.-Nivel de Hidrógeno
.-Grado de embridamiento
.-Espesor de la junta
.-Vías de disipación

Solo es una medida aproximada de la susceptibilidad a la fisuración.

En algunos casos a las fórmulas de CE se le adicionan términos que tienen en cuenta estos factores, como es el caso de la formula de Ito y Bessyo en la que el valor del CE se llama Parámetro de Composición Pcm que tiene como agregado los últimos términos valores que tienen en cuenta al Hidrógeno, al grado de Embridamiento y al espesor.

Pcm = %C + % Mn / 20 +% Cr/ 20 + % Cu / 20 + % Mo / 15 + % Ni / 60+ %V / 10 + % Si / 30 + 5 % B **+ H / 60 +A x t /600**

Donde H es la cantidad de Hidrógeno disuelto en el metal depositado en (cm3 / 100g de metal depositado)

H = 5 Para electrodos de extra bajo hidrógeno
H = 6 Para electrodos de bajo Hidrógeno
H = > 25 Para electrodos rutilicos / celulósicos
.- A = 1 para juntas libres. A = 2 para juntas embridadas
.- t es el espesor en mm.

Con estos valores la Temperatura de PC es:

TPC [ºC] = 1440 Pcm – 392

El IIW propone en cambio la siguiente formula:

CE = % C + % Mn / 6 + % Cr Mo V / 5 + 5 Si Ni Cu / 15

Y agrega que si:
CE < 0,35 No requiere PC
0,35 < CE < 0,55 Si requiere PC
CE > 0,55 Si requiere PC y además requiere TTPS

La mayoría de los códigos poseen tablas en alguna de estas formulas, de Temperaturas de PC mínimas.
Estas Temperaturas pueden ser demasiado conservativas o insuficientemente exigentes en casos particulares.
Para estos casos de incertidumbre o desconfianza en el uso de tablas se proponen métodos alternativos de cálculo de Temperaturas de PC. Estos métodos son:

.- METODO DE CONTROL DE DUREZA EN LA ZAC
.- METODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO
Ambos incluidos y recomendados en:“STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL” D 1.1 ANSI –AWS App.XI

.

7.2.1 METODO DE CONTROL DE DUREZA EN LA ZAC (MCD)

.- Se restringe solo a soldaduras de filete
.-Se asume que la soldadura no fisurará si la dureza de la ZAC se encuentra por debajo de cierto valor crítico:

Hv < 350 (331 HB) Aun con electrodos de bajo Hidrógeno
Hv < 400 (380 HB) Solo con electrodos de bajo Hidrógeno

.-Este método NO es compatible con riesgo de SCC (Corrosión bajo Tensión) ni tiene en cuenta iniciación de fractura frágil u otras condiciones de SERVICIO especiales.

.-Los valores de dureza máximos permisibles se controlan por intermedio de la velocidad de enfriamiento variando el heat-Input en una sola pasada y sin PC .Este método consiste en aplicar el concepto de **5.1.2.1** o sea modificar el ciclo térmico de Soldadura por intermedio de las variables de Soldadura, en este caso el Heat-Input

(MCD) APLICACIÓN

1) Se determina el CE con la formula de IIW:

CE = % C + % Mn / 6 + % Cr Mo V / 5 + 5 Si Ni Cu / 15

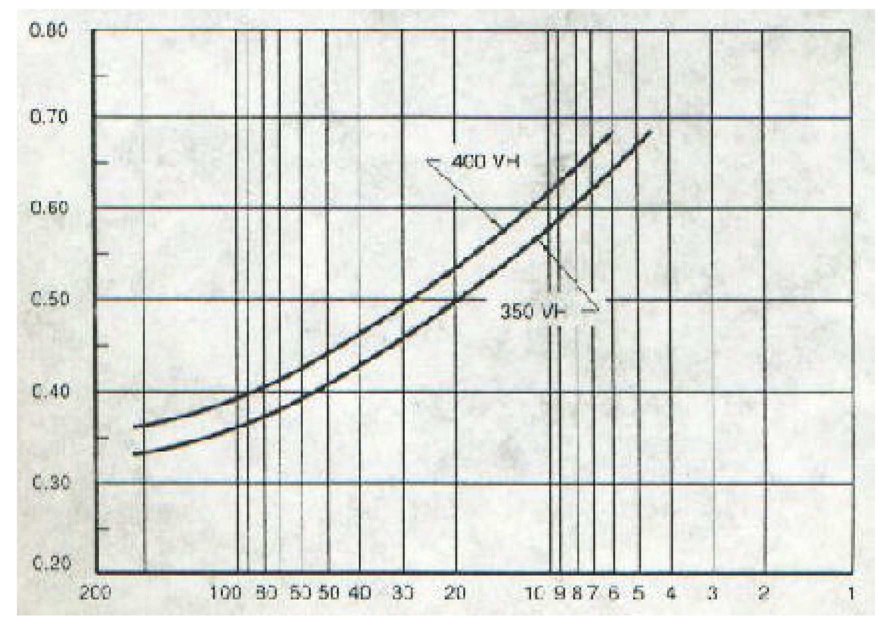
2) Se determina la Velocidad Critica de Enfriamiento de la FIG XI-2 del: " STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL" D 1.1 ANSI –AWS App.XI

3) Con la Velocidad Crítica y el espesor de la junta se determina de la Fig XI.3 el Heat-Input mínimo.

4) Se afecta de un coeficiente que depende del proceso de Soldadura que se use.
SAW: x 1
SAMAW: x 1, 5
GMAW- FCAW: x 1, 24

5) Con la Figura XI –4 se determinan las dimensiones del filete.

6) Si los valores del Heat-Input no son prácticos, o sea muy elevados debe usarse el METODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO y por intermedio del mismo determinar la Temperatura de PC necesaria.



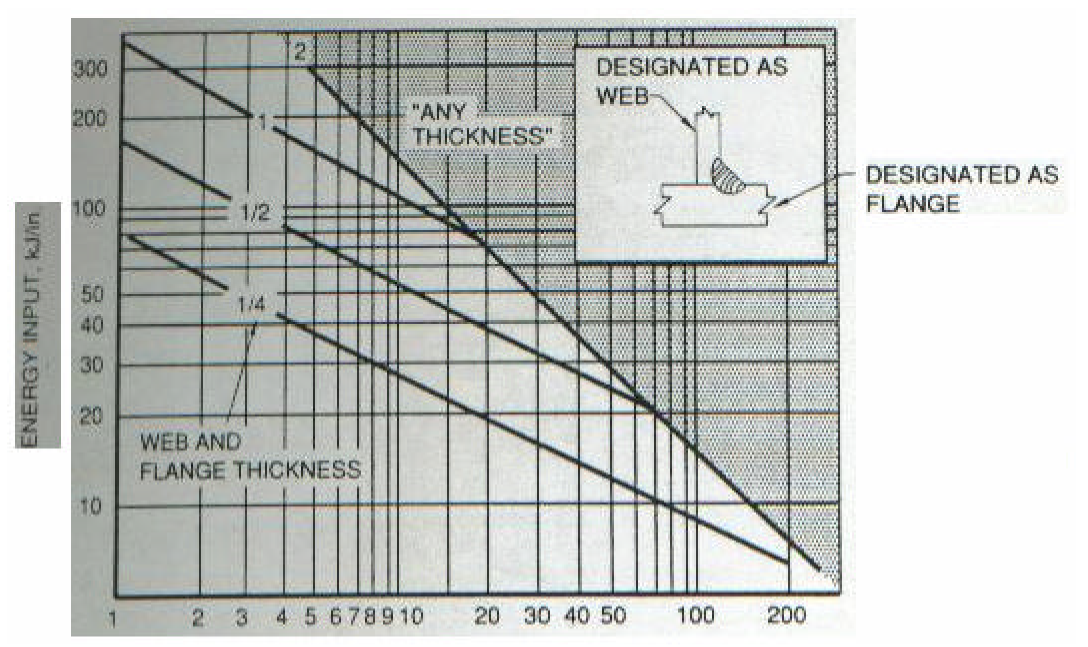


Fig 20. ANSI / AWS D1.1. Figure XI-3 Gráficos para Determinar velocidades de Enfriamiento para una pasada por Arco Sumergido

7.2.2 METODO DE CONTROL DE HIDRÓGENO (MCH)

1) Se asume que no ocurrirá fisuración si la cantidad de Hidrógeno remanente en la junta soldada luego de enfriada hasta 50ºC no sobrepasa un valor critico que depende de la composición química del acero y del grado de embridamiento
2) Este método estima que la Temperatura de PC necesaria para permitir al Hidrógeno difundir fuera del material afectado por la soldadura hasta valores por debajo del crítico
3) Este método abarca principalmente soldaduras a tope, si bien puede ser utilizado también en filetes cuando el método de control de dureza da valores de Heat Input muy elevados.
4) Este método se basa en una única pasada de soldadura de bajo heat Input que representa la pasada de raíz y asume que la ZAC se endurece por temple.
5) Este método es particularmente útil para aceros de alta resistencia con baja aleación cuya alta Templabilidad hace poco factible el uso dl método de control de dureza (Heat Input)
6) Por otra parte como este método asume que la ZAC endurece por temple, el PC calculado para un acero de baja Templabilidad puede ser demasiado conservativo

(MCH) APLICACIÓN

Este método utiliza los siguientes elementos de cálculo

1) Formula de Parámetro de Composición Pcm

2) Tabla XI-1 de"STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL" D 1.1 ANSI –AWS App.XI. Con ella se determina el Índice de Susceptibilidad en función de Pcm y el nivel de Hidrógeno de la junta soldada.

3) Tabla XI-2 del "STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL" D 1.1 ANSI –AWS App.XI. Con ella se determina la Temperatura de PC en función del nivel de embridamiento y del índice de Susceptibilidad

7.2.2.1 DETERMINACION DEL Pcm

Se hace en base a la composición química obtenida de

a) Certificados del fabricante
b) Análisis Químicos de Producción
c) Composición Química de la Especificación (Valores Máximos)
d) Análisis Químicos de Control (Usuario)

DETERMINACION DEL NIVEL DE HIDRÓGENO

El nivel de Hidrógeno se determina de la siguiente manera:

Nivel H1 Extra Bajo Nivel de Hidrógeno

Los consumibles de este grupo deben tener menos de 5ml cada 100g de metal depositado de acuerdo a ISO 3690-76 (E) o un contenido de humedad del revestimiento máximo de 0,2% de acuerdo a AWS A5.1 o AWS A5.5.

Los electrodos de Extra bajo Hidrógeno deben estar embalados herméticamente o en su defecto deben ser secados a (370`C – 400`C) durante 1 hora y usados dentro de las 2 horas de abierto el embalaje o sacados del horno.

A este grupo pertenecen los alambres macizos de GMAW convenientemente limpios

Nivel H2 Bajo Nivel de Hidrógeno

Deben tener menos de 10 ml cada 100g de metal depositado o 0,4% máximo de humedad en el revestimiento (AWS A5.1).Deben estar envasados herméticamente (4.5.2 D1.1 Steel ANSI AWS) y utilizados dentro de las 4 horas de abierto el embalaje.

En el caso de SAW el Flux debe estar embalado herméticamente libre de oxido, suciedad o humedad. Debe usarse dentro de los 6 meses de comprado, y en el caso de envoltorios en mal estado deben descartarse o secarse a 260`C mínimo. El Flux mojado debe descartarse. Ver ANSI AWS D1.1-94.Steel.

Nivel H3 Todos los Consumibles que no califican según H1 o H2

7.2.2.2 GRADO DE EMBRIDAMIENTO

Se obtiene por cálculo y / o experiencia:

EMBRIDAMIENTO BAJO: Soldaduras de filete o a tope con una con una razonable libertad de movimiento de las partes

EMBRIDAMIENTO MEDIO: Soldaduras de filete o a tope de miembros ya conectados a la estructura donde existe una disminución de libertad de movimiento.

EMBRIDAMIENTO ALTO: Donde casi no existe libertad de movimiento, tal como en reparaciones en altos espesores.

7.2.2.3 EJEMPLO DE CALCULO DE TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

Calculo de la temperatura de PC de un acero estructural ASTM A572-50 soldado a tope de 1” de espesor con electrodos de bajo Hidrógeno.

De acuerdo a especificaciones de ASTM la Composición Química es.

%C: 0,23 ; %Mn : 1,35 ; %P: 0,04 max ; %S: 0,05 max ; %Si: 0,3 max ; %Cu: 0,2 min

Pcm = 0,32; CE = 0,52

1) Corresponde a la Zona II de acuerdo a CE = 0,52 y %C = 0,23
2) El índice de susceptibilidad será :

D si H = H1
E si H = H2
F si H = H3

Suponemos usar H = H2
Si el Embridamiento corresponde a un nivel medio TPC = 138°C
Si fuese una reparación el embridamiento seria alto y TPC = 150°C

7.2.2.4 CUAL METODO USAR, (MCD) O (MCH)?

1) Primeramente se determina el **CE = % C + % Mn / 6 + % Cr Mo V / 5 + 5 Si Ni Cu / 15** con el objeto de localizar nuestro acero en la Fig.XI –1 del apéndice XI del“STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL” D 1.1 ANSI –AWS App.XI.
De acuerdo a la Zona en donde se encuentre se toman las siguientes acciones

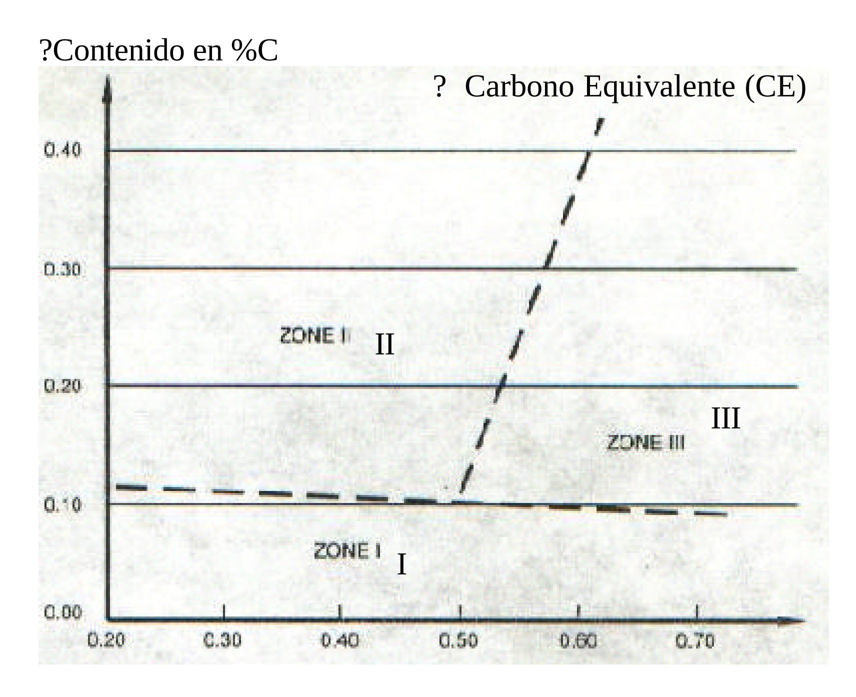


Fig.21. ANSI / AWS D1.1. Figure XI-1Zone Classification of steels.
Carbon Equivalent (CE) CE = C + (Mn +Si)/ 6+ (Cr + Mo +V) + (Ni +Cu)/15

Zona I (Zona Inferior de Fig. 21).La Fisuración es improbable pero puede ocurrir con alto Hidrógeno o alto embridamiento. Se usa el Método de Control de Hidrógeno.

Zona II (Zona Izquierda de Fig.21) Se usa el método de control de dureza para determinar el mínimo Heat Input para soldaduras de FILETE en una sola pasada.
Si el Heat Input no es práctico se debe usar el método de control de Hidrógeno para determinar la Temperatura de PC
Para soldaduras a tope se debe usar el método de control de Hidrógeno. Para aceros de alto %C en soldaduras a tope o filete se permite requerir ambos métodos para controlar tanto la dureza como el contenido de Hidrógeno.

Zona III Es la zona mas peligrosa de las tres, entran en ella los aceros Templados y Revenidos. Estos aceros son muy templables, como por ejemplo los aceros de barras de construcción.
Se usa el método de control de Hidrógeno, sobre todo en aceros Templados y Revenidos donde el Heat Input debe limitarse para evitar que las Propiedades Mecánicas de la ZAC queden lo menos modificadas posible por el ciclo térmico de la soldadura.

7.3 FACTORES CONTRAPRODUCENTES DEL PRECALENTAMIENTO

Lo que sigue debe tomarse como posibles excepciones y no como regla a seguir.

1) Si la Temperatura de PC es muy elevada y la velocidad de enfriamiento muy lenta la microestructura puede ser afectada. Un ejemplo es lo que ocurre con el Tamaño de Grano del material de aporte que crece y disminuye la tenacidad del mismo. Para evitar esto se especifica la temperatura máxima entre pasadas.
2) En algunos aceros Templados y Revenidos la Tenacidad de la ZAC puede disminuir cuando la Temperatura entre pasadas es muy elevada

7.4 PRECALENTAMIENTO DE ACEROS INOXIDABLES

7.4.1 **INOXIDABLES AUSTENITICOS** (Serie 300)

La HIC no es un problema estos aceros debido a su baja resistencia mecánica (baja dureza), solo cuando están deformados plásticamente en frío puede presentarse HIC.
Podría tenerse en cuenta para el caso de aceros disímiles cuando haya aceros Ferriticos en la junta soldada.
En general no se obtienen beneficios con el PC de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la Corrosión Intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de Cromo en borde de grano.
Además el PC aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico.
Es practica generalizada en la Soldadura de los aceros inoxidables austeniticos mantener la temperatura del material base (y la ZAC) lo mas baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es una práctica corriente limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70°C).
Como excepción y rara vez puede ser requerido un calentamiento a 500°C con el objeto de producir precipitación de carburos (de Nb) en aceros inoxidables AISI 347 estabilizados al Nb (Niobio) (en EEUU Columbio) o en aleaciones de Ni (Níquel) de una manera controlada para evitar la precipitación de los mismos en servicio produciendo fragilidad.
Este último Tratamiento se realiza si fuese necesario mediante un TTPS.

7.4.2 ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS DE ALTA MAQUINABILIDAD

No deben precalentarse. Si bien son mas difíciles de soldar, presentando porosidad y segregación. La segregación puede producir fisuración en Caliente y debe soldarse con electrodos de alto contenido de Ferrita δ tales como el E 312. Debe evitarse toda presencia de Hidrógeno.

7.4.3 ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS

Son aquellos que contienen un mínimo de 10% de Cr y tienen una estructura constituida por Ferrita y Carburos. Estos aceros son menos dúctiles que los austeniticos y por lo tanto más susceptibles de fisuración por soldadura.
Pueden dividirse en aceros de primera y segunda generación. Al primer grupo pertenecen aceros del tipo 430, menos decarburados durante su fabricación, que forman durante el enfriamiento de la soldadura cantidades importantes de Martensita en el borde de grano, (por estar el Cr mas concentrado en el centro del grano) lo que incrementa La susceptibilidad a la fisuración. En estos casos conviene precalentar entre 150°C y 230°C para minimizar la formación de fisuras. Por otra parte en estos aceros no existe el problema del crecimiento de grano a altas temperaturas durante la soldadura debido precisamente a la presencia de Austenita en el borde de grano. Esta Austenita es la que durante el enfriamiento se transforma en Martensita.
El segundo grupo, más moderno, decarburados por el método Argón-Oxígeno contiene aceros totalmente Ferriticos, y con mayor ductilidad por la ausencia de impurezas insterciciales (C y N).
Debido a la ausencia de Martensita no es necesario precalentarlos y hasta es deseable no hacerlo pues la soldadura produce el aumento de tamaño de grano en el material base inmediatamente adyacente al metal de

aporte. La tenacidad se reduce por esta razón particularmente en secciones gruesas y no puede ser restituida por TTPS. Aceros de este grupo son: 409, 446, 26Cr-1Mo (DIN).

7.4.4 ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS

Debido a su alta Templabilidad, en la ZAC de estos aceros se forma gran cantidad de Martensita cuya dureza y fragilidad promueven la fisuración de la soldadura, la que se incrementa con el % de Carbono del acero, que en el caso de Aceros Martensíticos es particularmente alto.
Este problema se resuelve parcialmente con PC de cómo mínimo 200°C pero si la pieza tiene espesores gruesos o gruesos y finos se sugiere aumentar la Temperatura de PC a valores de 300°C / 350°C.
Hay que tener presente que a estos aceros además del PC debe realizárseles un TTPS para revenir (ablandar) la Martensita restante. Esto ultimo se hace particularmente necesario si % C > 0.2

7.4.5 ALEACIONES NO FERROSAS

7.4.5.1 ALUMINIO

No es usual precalentar Aluminio ni sus aleaciones. A veces suele hacerse por alguna de las siguientes razones:

.- En secciones gruesas, de alrededor de 1” para evitar falta de fusión sobre todo al comienzo de la soldadura debido a la alta conductividad térmica de este material (0,12 J/m seg. °C), cuatro veces superior a la del acero.
.- En juntas de espesores disímiles para lograr un balance calórico en ambos espesores.
.-Para evaporar la humedad o cuando las temperaturas son inferiores a 0°C.
.-En GTAW con corriente alterna para espesores superiores a 3/16”.
.-En GTAW con DCEP no es necesario pues solo se usa para espesores pequeños.
.-En GTAW con DCEN el PC puede evitarse o reducirse debido al gran Heat Input provisto por el electrodo negativo. Esta polaridad se usa para grandes espesores.
.-Puede reducir los costos de producción disminuyendo los tiempos de soldadura por alcanzarse más rápidamente la temperatura de fusión.
.- Los métodos de PC son en general localizados por llama, en soldadura automatizada se suelen utilizar torchas de TIG instaladas delante del electrodo de soldadura con el objeto de precalentar o secar la superficie.

Temperaturas de PC del Aluminio:

Rara vez excede los 300°C pues se afectaría las propiedades del material base. La serie 5000 correspondiente a aleaciones Tratables Térmicamente (envejecibles) con 3% de Mg no deben precalentarse a mas de 120°C por mas de 15 minutos manteniendo la temperatura entre pasadas inferior a 150°C para prevenir exfoliación.

Aleaciones con 4 a 4,5 % de Mg (5083, 5086, 5456) no deben precalentarse a más de 90°C si hay peligro de SCC.
A menudo una temperatura de 90°C al comienzo de la soldadura es suficiente para evitar problemas de falta de fusión sin necesidad de volver a reajustar los parámetros de soldadura una vez comenzada esta.
Se deben usar lápices de temperatura para el control de la temperatura pues sino se corre el riesgo de perder las propiedades del metal base.
El aluminio no cambia de color con las variaciones de temperatura por debajo del punto de fusión, por lo tanto la observación visual no es forma de controlar la temperatura.

7.4.5.2 COBRE Y SUS ALEACIONES

La Soldabilidad del Cu y sus aleaciones esta influenciada por su alta Conductividad Térmica.
La conductividad del acero es solo el 13% de la del Cu de ahí su gran diferencia de comportamiento con respecto al a fusión.
En general se prefiere soldar con GTAW o GMAW en vez de SMAW, se debe seleccionar la corriente de soldadura y el gas protector de tal manera de maximizar el Heat Input.
Aun así se necesita PC que en el caso de Cu puro llega a los 400 / 600 °C.
El espesor juega un papel importante, con espesores de hasta 3 mm no es necesario PC.
Para espesores mayores a 19 mm puede ser necesario precalentar a 600°C si bien se trata de no superar los 450°C pues el soldador trabaja incomodo y se formarían capas de oxido demasiado gruesas.
El Cu como todos los metales de estructura cristalina F.C.C. (cúbico centrado en las caras) no es susceptible de HIC, El ejemplo usual de fragilizacion del Cu por el Hidrógeno a alta temperatura es debida a la reacción entre el Hidrógeno y el oxigeno disuelto para formar vapor de agua.
En aleaciones de Cu como bronces, latones, cuproníqueles y cuproaluminios solo es necesario precalentar cuando se verifica que se produce una mala fusión y aun así no debe superarse los 150°C. Esto se debe a que estas aleaciones poseen buena plasticidad a temperatura ambiente y a alta temperatura, no así a temperaturas intermedias (150°C a 550°C para bronces y latones)
Para evitar fragilidad a temperaturas intermedias el tiempo de permanencia debe ser el mínimo posible, esto se logra enfriando rápidamente en dicho rango y para ello se debe evitar usar PC en estas aleaciones.

7.4.5.3 NIQUEL

Solo es necesario PC cuando no se obtiene una buena fusión del Metal base. Si se encuentra a una temperatura inferior a los 15 ° C conviene precalentar a una distancia de 200 mm a cada lado de la soldadura a una temperatura de 15 °C a 20°C para evitar condensaciones de humedad que puedan causar porosidad.
Las aleaciones de Ni se sueldan en estado de solución sólida. A las aleaciones endurecidas por precipitación (envejecibles) se les debe dar un calentamiento de solubilizacion y enfriamiento de retención de fase antes de soldar siempre y cuando luego de la soldadura se le realice un Distensionado (si es necesario) y el tratamiento final de precipitación (envejecido)

7.4.5.3 MAGNESIO

La mayoría de estas aleaciones pueden ser soldadas por GTAW o GMAW. En el caso de aleaciones fundidas la necesidad de PC depende del espesor y el grado de embridamiento, siendo este último factor el más critico. Secciones finas con alto embridamiento requieren PC particularmente en aleaciones de alto Zn. La fisuración se produce en el metal base y puede ser evitada por PC del orden de 300°C.

7.4.5.5 TITANIO

El PC no es necesario ni recomendable. La temperatura entre pasadas no debe superar los 175°C. Se lo anodiza con 10% de sulfato de amonio para la prevenir la incorporación de Hidrógeno al metal.

8. OTROS MODOS DE FALLA donde el precalentamiento NO tiene influencia.

8.1 FISURACIÓN EN CALIENTE

Tiene lugar en el metal de soldadura cuando aún está a alta temperatura, en este caso se llaman Fisuras de Solidificación. Rara vez ocurre en la ZAC y en este caso se llaman Fisuras por Licuación.
A menudo son invisibles y es necesario un plegado de cara para evidenciarlas. Se presentan como pequeñas fisuras de no más de 3 mm de longitud distribuidas al azar sobre el cordón, a las que se las denomina Microfisuras.
Se cree que el mecanismo es el resultado de la ruptura de una película intergranular líquida de bajo punto e fusión (1100ºC / 1200ºC), durante la contracción que tiene lugar cuando la Austenita se enfría desde su punto de fusión (1450ºC / 1500ºC).
Estos 300ºC de diferencia producen tensiones de contracción que cuando la soldadura tiene alto embridamiento produce fisuración. Se cree que además pueda influir la Transformación Peritectica de los aceros, que tiene lugar a esas temperaturas cercanas al punto de fusión.
Este tipo de fisuración es usual en Aceros Inoxidables totalmente Austeniticos. La presencia de Fósforo (P) y Azufre (S) promueven esta fisuración. La presencia de 3 a 5% de Ferrita delta (d) en los bordes de grano de a Austenita es el mejor remedio contra la fisuración en caliente de Aceros Inoxidables Austeníticos (Serie 300).
Otro factor a tener en cuenta es la Velocidad de Soldadura, cuanto mayor sea esta mayor será la tendencia a la Fisuración en Caliente.
Para evaluar la sensibilidad a la fisuración en caliente se utilizan ensayos tales como el "Fisco-Schnadt" para el metal de Soldadura y el "Varestraint" para el metal de soldadura y el metal base.
El efecto del Precalentamiento sobre la aparición de este tipo de defectos es, si no perjudicial, por lo menos insignificante.

8.2 DESGARRE LAMINAR. WELDING HANDBOOK. Vol. I.Pag.137.

.- Esta Fisuración está asociada a soldaduras embridadas de tal manera que se producen Tensiones de Tracción demasiado elevadas (incluye a las Tensiones Residuales debidas al espesor) transversalmente al plano de laminación del material base, o sea perpendiculares al espesor.
En esta dirección, el material base, que en algún momento de su historia térmica ha sido laminado, tiene menor plasticidad (alargamiento) que en la dirección del laminado. La suma de estos dos factores genera fisuras paralelas a la superficie e invisibles desde el exterior.

.- El desgarre laminar ocurre generalmente durante el proceso de fabricación o montaje (no en servicio)

.- La calidad del material base (acero) es importante, las especificaciones de Ingeniería deben limitar el nivel de inclusiones en las especificaciones de compra.

.- Se las reconoce por estar fuera de la ZAC a diferencia de la Fisuración por HIC.

.- El Diseño debe especificar ensayos de US luego de la fabricación o montaje o ambos para aquellas uniones Soldadas que pudieran estar sujetas a altos embridamiento en la dirección del espesor (juntas en T, etc.)

.- El Precalentamiento no es considerado apto para evitar este tipo de fisuración aunque en condiciones límites Podría reducir o distribuir más favorablemente las tensiones.

8.3 FISURACION POR RECALENTAMIENTO

Es un tipo complejo de fisuración que afecta ciertas áreas especificas de la ZAC, que ha sido sujeta a varios ciclos térmicos de soldadura, y se puede observar solo después de un Tratamiento Térmico post Soldadura.
El mecanismo de fisuración pareciera estar asociado a la temperatura y a las tensiones inducidas en borde de grano de la ZAC por precipitados que impiden la deformación plástica durante el Tratamiento Térmico post Soldadura. El Precalentamiento no influye en este tipo de fisuración.

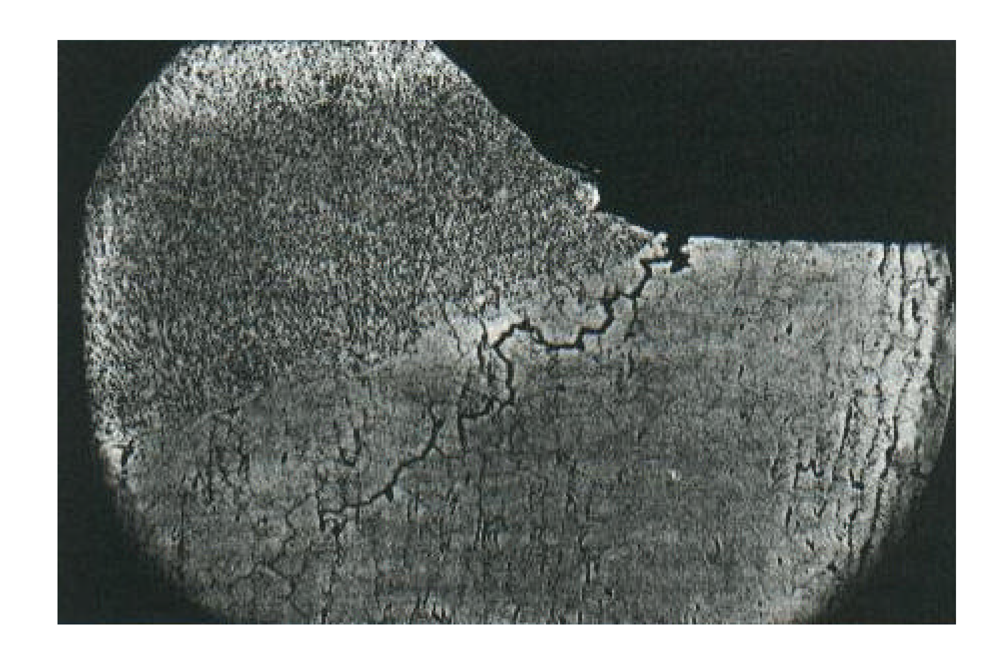


Fig. 22. Fisuración por Recalentamiento en una soldadura de un acero Austenítico.

SECCION V

9. TRATAMIENTOS TERMICOS .GENERAL.

Los diferentes Tratamientos Térmicos (TT) a los que puede estar sometido un metal se dividen en dos grupos de acuerdo con la temperatura alcanzada:

.- TT Subcriticos cuando la temperatura alcanzada es inferior a la temperatura critica, (de Cambio Alotrópico, o de Recristalizacion)
.- TT Supercríticos o de Recristalizacion cuando la temperatura alcanzada es superior a la temperatura critica, (de Cambio Alotrópico, o de Recristalizacion)

Los metales y/o aleaciones poseen en ciertos casos (el acero es uno de ellos) una temperatura critica por encima de la cual ocurre la recristalizacion de la estructura Metalografía por medio del cambio alotrópico.
En el acero la temperatura crítica varía con los elementos de aleación. En el caso de los aceros al Carbono o sin aleantes la temperatura crítica por encima de la que comienza la Recristalizacion es en promedio 727°C.

	Temperaturas criticas en Calentamiento a 28°C /h		**Temperaturas Criticas en Enfriamiento a 28°C /h**	
Acero	**Ac1 °C**	**Ac3 °C**	**Ar3 °C**	**Ar1 °C**
1010	724	877	849	682
1020	724	846	816	682
1030	727	813	788	677
1040	727	793	757	671
1050	727	768	741	682
1060	727	746	727	685
1070	727	732	710	691
1080	729	735	699	693
1340	716	777	721	621
3140	735	766	721	660
4027	727	807	760	671
4042	727	793	732	654
4130	757	810	754	693
4140	732	804	743	679
4150	743	766	729	671
4340	724	774	710	654
4615	727	810	760	649
5046	716	771	732	682
5120	766	838	799	699
5140	738	788	727	693
5160	710	766	716	677
52100	727	768	716	688
6150	749	788	743	693
8115	721	838	788	671
8620	732	829	768	660
8640	732	779	727	666
9260	743	816	749	713

Fig.20 Temperaturas Criticas de aceros al
Carbono y dé baja aleación. Serie SAE. Metals Handbook. Heat Treating

Variedad	Composición Química					Temperatura Critica	
% Cr	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ac1 °C	Ac3 °C
0,50	0,10-0,20	0,30-0,60	0,10-0,30	0,5-0,7	0,45-0,65	760	880
1,25	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	1-1,5	0,45-0,65	775	890
2	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	1,75-2.25	0,45-0,65	780	880
2.25	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	2-2,5	0,90-1,1	780	880
5	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50	4-6	0,45-0,65	818	882
5 Si	≤ 0,15	0,30-0,60	1-2	4-6	0,45-0,65	843	877
7	≤ 0,15	0,30-0,60	≤ 0,50-1	6-8	0,45-0,65	827	882
9 M	≤ 0,15	0,30-0,60	1	8-10	0,90-1,1	824	885
	S y P ≤0,03%						

Fig.21. Temperaturas Criticas de los Aceros al Cr-Mo ASTM utilizados en la Industria Petroquímica. Metalurgia de la Soldadura. Daniel Seferian. Ed. Tecnos. España.

Algunos elementos de aleación elevan las Temperaturas críticas del acero mientras que otros las disminuyen. Los que las elevan se denominan elementos de aleación Alfágenos mientras que los que las disminuyen se llaman Gammágenos.

Alfágenos	Be Si Ti Ge Nb Ta P V As Mo B S Cr Zr W Al Sn Sb
Gammágenos	C Mn Co Cu Ru Os N Ni Zn Rh Ir Pd Pt Au

Fig. 22. Clasificación de los elementos de aleación del acero según su condición de Alfágeno o Gammágeno

Es importante conocer las Temperaturas Criticas de las diferentes aleaciones ya que suelen ser los valores máximos durante los calentamientos en los Tratamientos Térmicos Subcriticos.

Un error frecuente es creer que la temperatura de 727°C es la temperatura crítica de cualquier acero. Solo los aceros al Carbono (sin aleantes) tienen esa temperatura crítica.
Como se ve en la Fig. 2. la Temperatura crítica de un acero con 0,5% de Cr y 0,5% de Mo es de 760°C y con 5% de Cr y 0,5% de Mo la Temperatura crítica alcanza los 820°C.

Si observamos el Diagrama de Equilibrio Estable Fe – C (Hierro –Carbono) vemos que la Temperatura critica esta representada por la horizontal $Ac_{1,}$ temperatura a la que comienza la Recristalizacion Alotrópica.
La temperatura Ac_3 también llamada Temperatura Critica superior es aquella a la que la Recristalizacion es completa y depende del % C del acero en cuestión, en cambio Ac_1 no depende del mismo. Desde nuestro punto de vista la temperatura Crítica que nos interesa es Ac_1, comienzo de la recristalizacion.

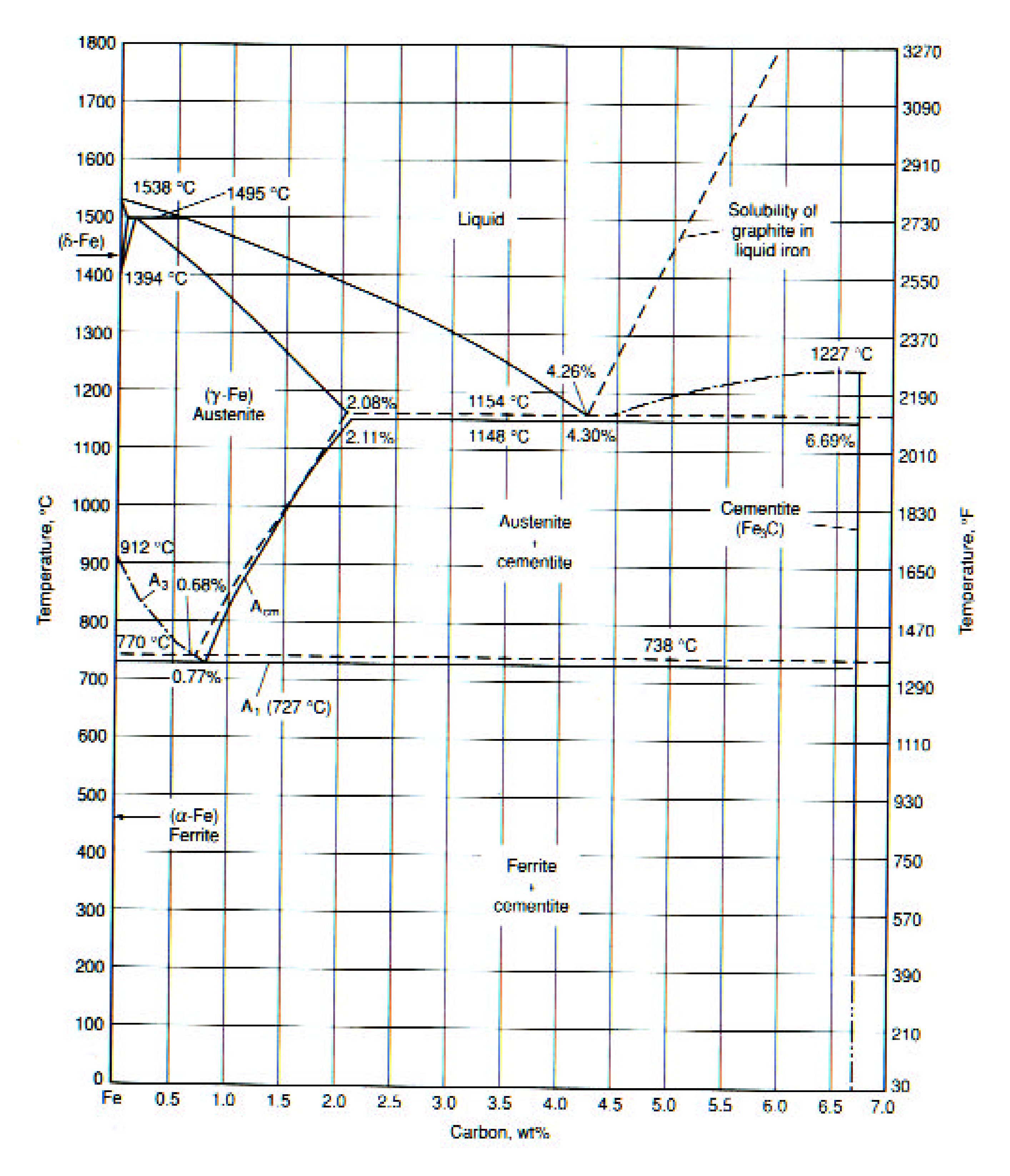
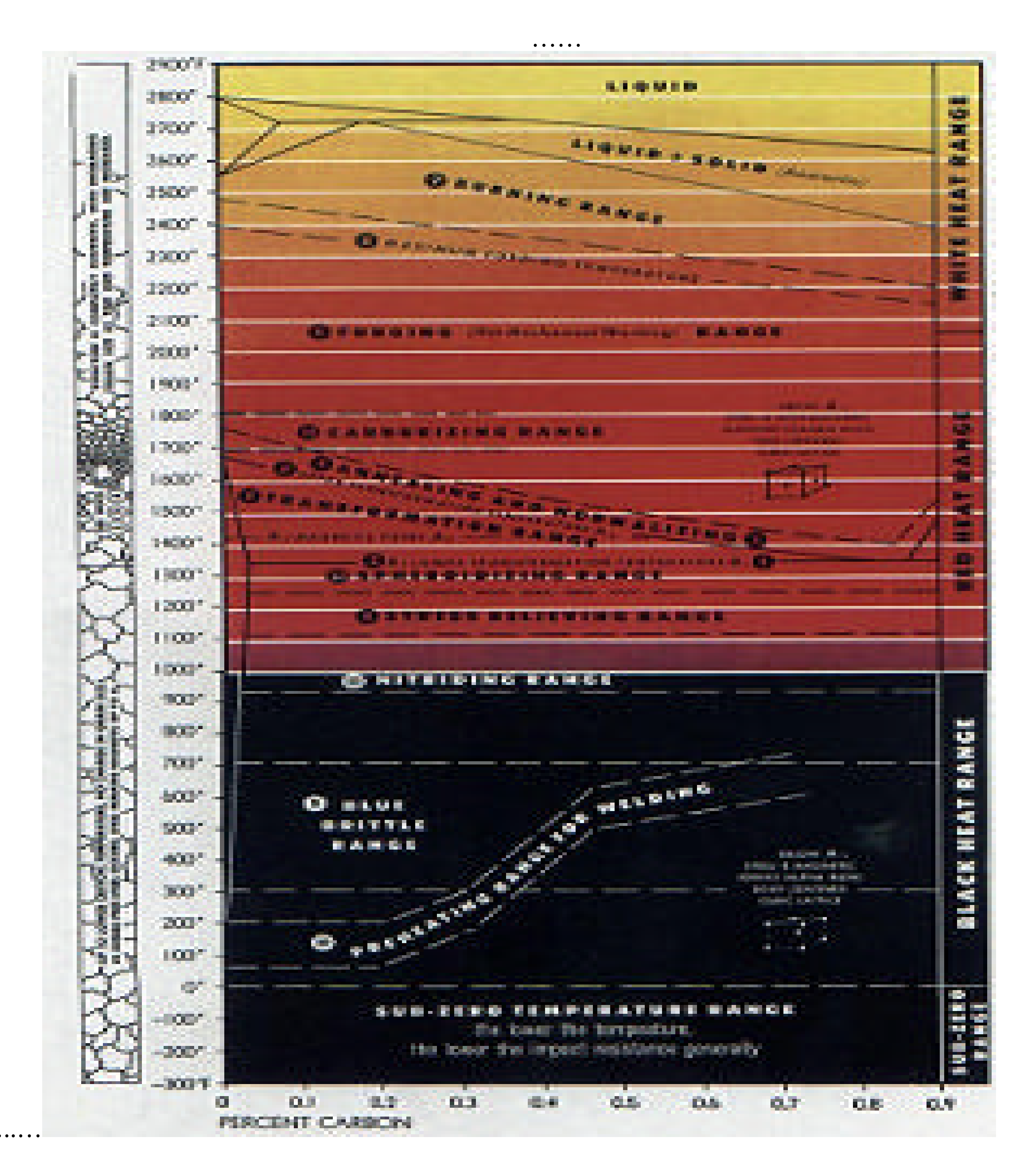


Fig. 23. Diagrama de equilibrio Fe-C hasta 6,67 %C. Las líneas Sólidas indican el diagrama Fe-Cementita (Fe-CFe3) y las líneas punteadas el Diagrama Fe-Grafito. Metals Handbook. Heat Treating.

……



……..…

Fig. 24 Diagrama Fe-C mostrando el campo Ferrítico y los diferentes tipos de Tratamiento Térmico.

9.1 TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA

.- La mayoría de los Tratamientos Térmicos de Soldadura son Subcriticos y no de Recristalizacion Alotrópica (Austenización) como ocurre en los aceros de construcción de elementos de máquinas (ejes, engranajes, etc.)

Dijimos anteriormente en Sección II que el ciclo térmico de la soldadura produce tres (3) efectos indeseables, como ser

1) La generación de Tensiones residuales que pueden quedar en el material produciendo fragilidad en soldaduras de espesores importantes ($\approx >$ 1") o no quedar produciendo distorsión, sobre todo en elementos esbeltos o mecanizados luego de la soldadura.
2) Modificación de la Estructura del material, esencialmente aumentando la dureza en la ZAC y produciendo Fragilidad, susceptibilidad a SCC y a HIC
3) La absorción de gases, especialmente Hidrógeno, por la soldadura

Analizaremos en esta sección los primeros dos ya que el tema de l Hidrógeno ya fue visto exhaustivamente anteriormente.

Si el TTPS tiene como función eliminar las Tensiones Residuales en este caso se lo llama:

DISTENSIONADO: Se lo realiza en aceros Ferríticos de baja aleación entre los 595°C y los 675°C (1100°F a 1250°F), para aceros de alta aleación, puede llegar (sin generalizar, estudiando cada situación particular) a los 1000°C aunque la mayoría de las veces no supera los 760°C.

Si por el contrario el objetivo es disminuir la dureza producida esencialmente por estructuras Martensíticas en la ZAC el TTPS en este caso se llama:

REVENIDO, un Tratamiento Térmico que siempre se realiza en aceros que se han templado (Total o parcialmente Martensíticos) con el objeto de disminuir la dureza debido a que esta influye en dos tipos corrientes de Fisuración:
.- Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC)
.- Fisuración por Corrosión bajo Tensión

Usualmente en obra, cuando se esta haciendo este Tratamiento, muy común en aceros aleados al Cr Mo tipo P5, P9, P91 etc. se lo denomina erróneamente Distensionado, aunque disminuya las eventuales tensiones residuales que pudiera haber producido la Soldadura.
En estos casos si la palabra revenido nos parece "demasiado" metalúrgica es preferible denominarlo Tratamiento Térmico post Soldadura y no Distensionado.
Estos dos Tratamientos Térmicos de Soldadura son Tratamientos Subcriticos y conviene recordarlo debido a que tienen un límite superior de temperatura a respetar, la Temperatura Critica

9.2 DISTENSIONADO

Se utiliza para relevar las tensiones residuales que pudieran haber quedado como consecuencia de un proceso de fabricación, en nuestro caso la soldadura.
El Distensionado puede ser integral o localizado, se realiza a una temperatura adecuada al material en cuestión por debajo de la temperatura de Transformación (Ac1 para aceros Ferríticos) por un determinado tiempo seguido de un enfriamiento controlado.
Debe tenerse cuidado en asegurar el enfriamiento uniforme, particularmente cuando el componente tiene diferentes espesores. Si la Velocidad de enfriamiento no es uniforme, pueden generarse nuevas tensiones residuales iguales o mayores que las originales.
El Distensionado puede reducir la distorsión y las Tensiones Residuales provenientes de la soldadura. La presencia de tensiones residuales puede producir SCC cerca de la soldadura (aun sin cargas externas) y en Zonas del componente que hayan sufrido deformación plástica en frío (**Además la deformación plástica en frío puede producir una reducción en la resistencia al Creep a temperaturas elevadas).**
Tensiones residuales en un acero Ferritico reduce la resistencia a la fractura frágil. En materiales no propensos a la fractura frágil, tal como los aceros inoxidables Austeniticos, las tensiones residuales pueden ser suficientes por si solas para producir SCC aun en medios aparentemente benignos. Ver Helmut Thielsch, Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping, Reinhold, 1965, p 311.
Además de ser la Soldadura una fuente de tensiones residuales no hay que olvidar que estas pueden ser generadas también durante el Laminado, Fundición, Forja, corte por cizalla, curvado, Trefilado, Temple y Mecanizado.

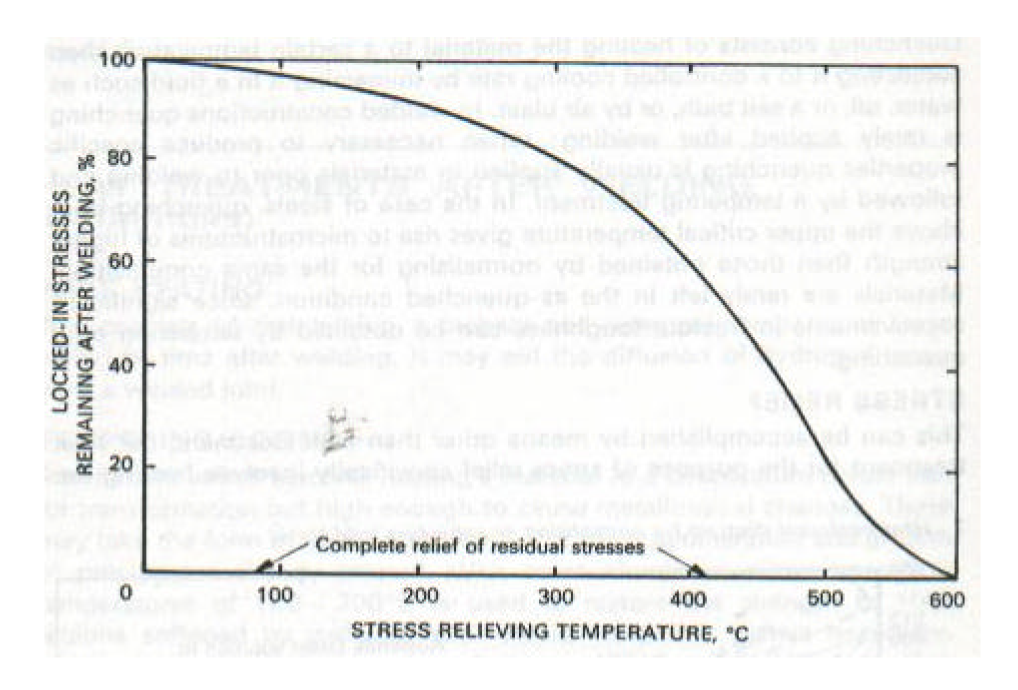


Fig.25. Disminución de las Tensiones Residuales con la temperatura de Tratamiento Termico.

Cuando se requiere un Mecanizado luego de la soldadura la presencia de TR puede generar distorsión del componente soldado durante la operación de mecanizado. Esto tiene lugar debido a que el material retirado por el mecanizado soportaba parte del sistema de tensiones residuales que se encontraba en equilibrio, de tal manera que el mecanizado permite que las tensiones del material que queda no están equilibradas por las tensiones del material que fue retirado de tal manera que se producen distorsiones muchas veces inaceptables. Con el objeto de lograr la estabilidad dimensional del componente durante el mecanizado es necesario un TTPS de Distensionado. Este problema es general en todos los materiales pero es más severo en los aceros Austeniticos debido a su alto coeficiente de dilatación.

9.2.1 MECANISMO

El relevo de las TR es influenciado por varios factores, Nivel de Tensión, Tiempo permisible (o practicable) para el relevo, Temperatura y Estabilidad Metalúrgica.
Factor Tiempo-Temperatura. El relevo de TR es un fenómeno función del Tiempo y la Temperatura, relacionados parametricamente por la ecuación de Larson-Miller:

Efecto Térmico = T (Log t + 20) / 1000 Ec. 1

Donde T es la temperatura en grados Rankine (T°R = T°F +460) y t es el tiempo en horas. Es evidente (Fig 2 Metals Handbook Vol. 4. Heat Treating) que una misma disminución de TR puede lograrse manteniendo el componente por mas largos periodos a menor temperatura. Por ejemplo mantener una pieza a 595°C por 6 horas produce el mismo Distensionado que a 650°C por 1 hora.
El Distensionado representa un típico caso de relajación de tensiones por Creep a escala microscópica y a veces macroscópica, a la temperatura de Tratamiento.
Materiales resistentes al Creep tales como los aceros aleados al Cr Mo normalmente requieren temperaturas mas altas que la de los aceros al carbono, las que en algunos casos pueden llegar a los 750°C – 850°C.
En aceros inoxidables Austeníticos por razones de Sensitizacion el Distensionado se realiza a temperaturas del orden de 400°C, a esta temperatura las TR solo disminuyen parcialmente, para lograr un Distensionado completo la temperatura debería oscilar entre los 500°C – 800°C.
La Sensitizacion es una disminución del % de Cr disuelto en borde de grano por precipitación de carburos de Cromo en el mismo .Esto disminuye la resistencia a la corrosión del acero, sobre todo SCC en servicio. Frecuentemente (en talleres de Tratamiento Térmico) se utiliza un Tratamiento de solubilización a 1050°C con un enfriamiento posterior relativamente rápido, para reducir las TR a valores aceptablemente bajos.

Algunas aleaciones de cobre pueden fallar por SCC debido a la presencia de TR, las que usualmente se relevan por tratamientos térmicos o mecánicos. Los tratamientos Térmicos de Distensionado son preferibles por que ser más controlables, menos costosos y permiten mayor estabilidad dimensional. Usualmente las temperaturas de Distensionado en aleaciones de cobre se realizan a relativamente bajas temperaturas, entre 200°C y 400°C.

La resistencia de un material a reducir sus TR puede estimarse conociendo la influencia de la temperatura en su resistencia a la fluencia. La Fig. 3 provee curvas de disminución de σ_f $(\sigma_{0,2})$ en función de la temperatura, observándose que para relevar las TR el componente debe ser calentado a la temperatura donde su resistencia a la fluencia (σ_f ; $\sigma_{0,2}$) se aproxime al nivel de TR aceptable. El mantenimiento a esa temperatura producirá deformación por Creep reduciendo las TR. Se requiere que el enfriamiento posterior sea uniforme para no agregar TR debidas al enfriamiento posterior.

DISTENSIONADO MECANICO POR DEFORMACIÓN PLASTICA DEL MATERIAL. Welding Institute. Abington Hall. Abington. Cambridge.U.K.

Cuando es necesario el relevo de TR pero los efectos Metalúrgicos de los Tratamientos Térmicos son inaceptables es posible lograrlo por medios mecánicos.
Como vimos anteriormente en una junta soldada la situación que se presenta es la un material de aporte con tensiones residuales de tracción en la dirección del cordón de soldadura en equilibrio con un material base aledaño en compresión.
En la mayoría de los casos el nivel de Tensión en el cordón de soldadura alcanza la fluencia.
La aplicación de una carga externa produce tensiones de Tracción que causan la fluencia del material sin el correspondiente aumento de la Tensión.
Si el material base es tensionado hasta la fluencia la diferencia entre las tensiones en la chapa y la soldadura se reducen a valores muy pequeños y luego de la descarga se observara que el pico de tensiones de tracción desapareció Fig.26.

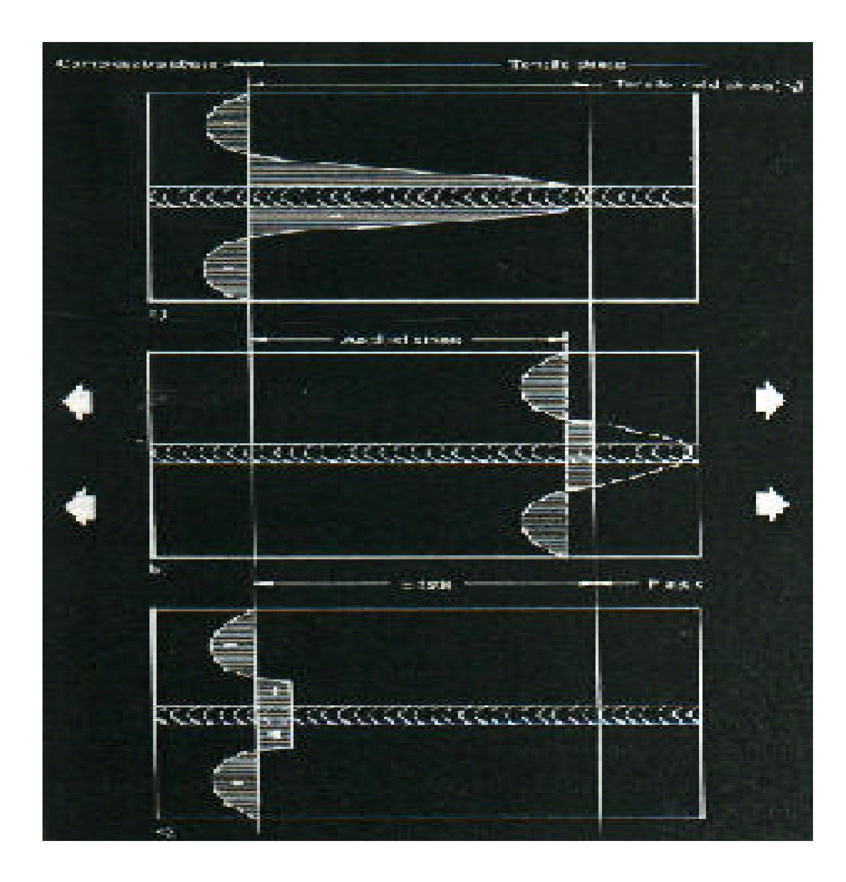


Fig. 26. mecanismo de Distensionado Mecánico de una junta soldada por sobrecarga hasta el Régimen Plástico. Welding Institute. Abington Hall. Abington. Cambridge.U.K.

9.2.3 DISTENSIONADO POR VIBRACIONES

Si bien esta publicación concierne a los Tratamientos Térmicos incluiremos muy brevemente el tema de Distensionado por Vibraciones. ASTM publico en 1988 "Mechanical Relaxation of Residual Stresses" STP 993, las presentaciones en el "International Symposium of Mechanical Relaxation of Residual Stresses" Cincinnati, Ohio Apr.30 1987.
Las conclusiones de esta publicación pueden resumirse el los siguientes párrafos:

1) "Las Tensiones Residuales de Tracción son reducidas mas fácilmente que las de Compresión por el Proceso de Distensionado por Vibraciones"
2) "Este Proceso puede ser usado para relevamiento de Tensiones de piezas para las que un Tratamiento Térmico de Distensionado no puede ser usado. Sin embargo debe recordarse que el relevamiento de Tensiones es solo parcial"
3) La medición de Tensiones residuales por la técnica del Agujero Ciego (ASTM E 837-81 Standard method for DETERMINING RESIDUAL STRESSES BY THE HOLE- DRILLING STRAIN – GAGE METHOD) utilizada para medir TR en una estructura fabricada con chapa arrojo una disminución de TR de entre 30% y 57%"
Como información adicional podemos decir que en el mercado hay dos técnicas vibracionales, la Resonante y la Sub-resonante en las que cambia la frecuencia utilizada, la subresonante utiliza frecuencias a las que la estructura vibra a amplitudes menores, y los fabricantes del equipo sostienen que el Distensionado es mas efectivo que a las mayores amplitudes del Distensionado resonante.
Nota:
Se pudo comprobar que si se le aplica la técnica vibratoria a materiales a los que se les ha introducido tensiones residuales de compresión por Peening, Spot–Heating o Spot Compresión para mejorar su resistencia a la fatiga NO se obtiene una disminución de la resistencia a la fatiga por lo que se desprende que la técnica vibratoria NO releva las tensiones residuales de compresión introducidas localmente.

Este método es mas apto a estructuras esbeltas, por ejemplo bastidores y estructuras para prevenir problemas de distorsión durante el posterior mecanizado y no en recipientes o cañerías donde exista la posibilidad de falla por Fatiga, por Fractura Frágil o Corrosión bajo tensión (SCC). Además ASME no lo permite como reemplazo de los Tratamientos Térmicos.

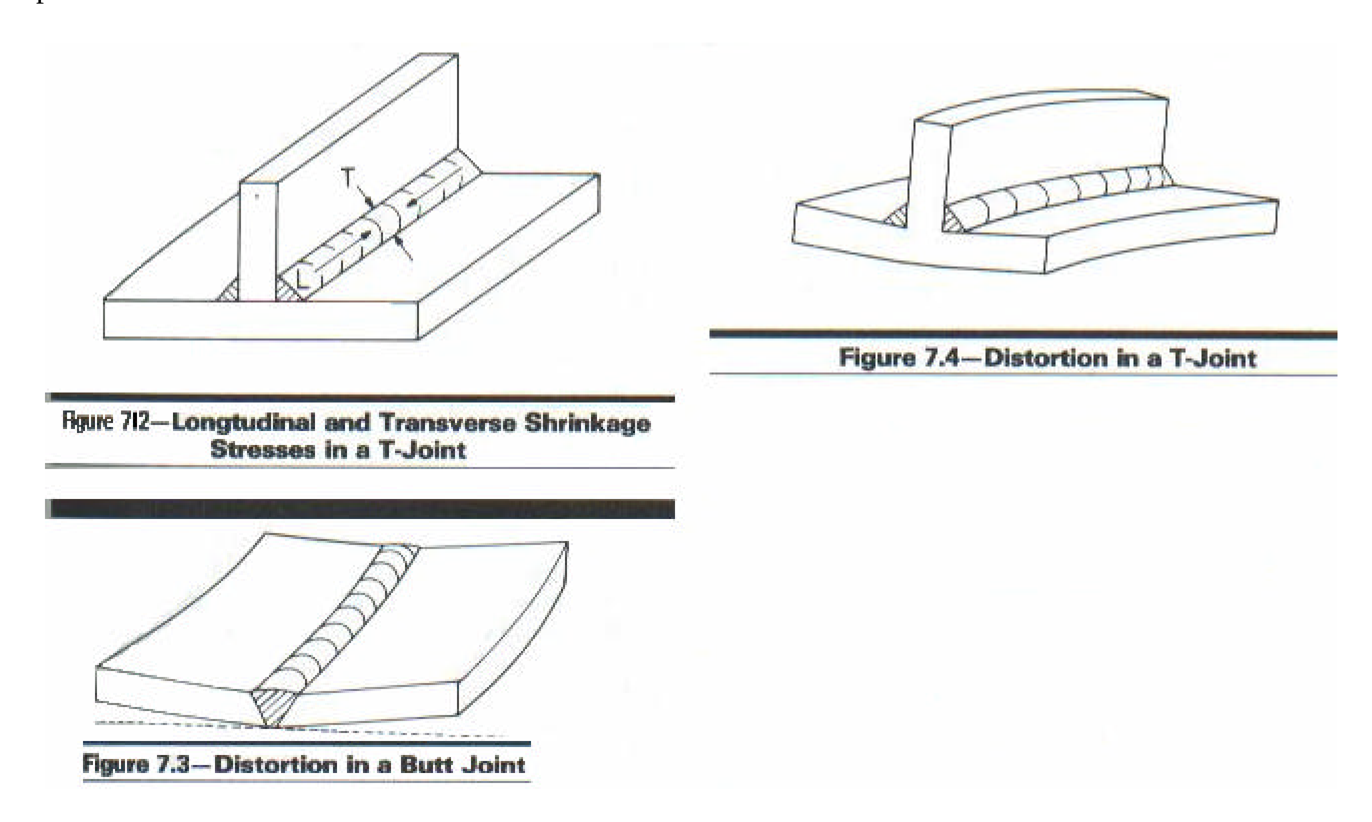


Fig.27.Contracción y Distorsión de Soldaduras

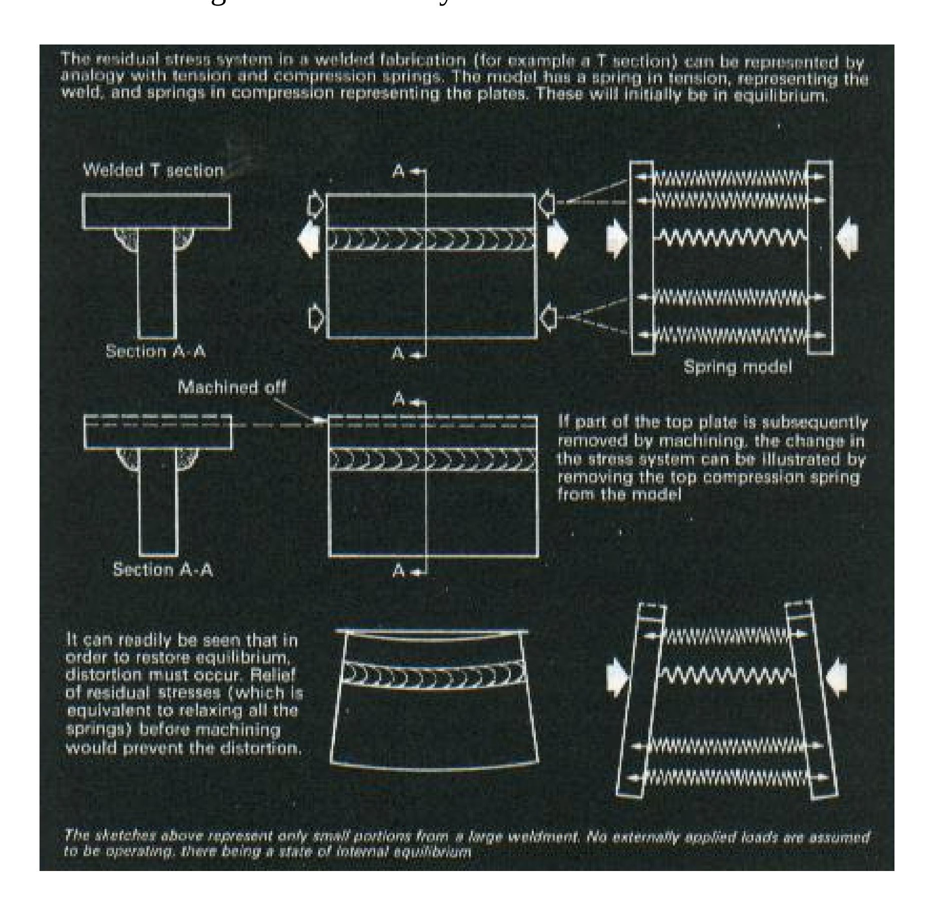


Fig. 28 Distorsión durante el mecanizado de componentes Soldados

9.3 REVENIDO O TTPS DE ABLANDAMIENTO

Ya habíamos comentado que hay dos razones para realizar TTPS, la primera es Distensionar, o sea eliminar o reducir las Tensiones Residuales. La otra razón es el ablandamiento de la ZAC o del mismo metal de aporte ya que el ciclo Térmico produce una modificación de la estructura Metalografica (léase aumento de dureza) indeseable.
.-Una alta dureza en la ZAC o MB de por si no es recomendable por la inherente fragilidad de las mismas, recuérdese que un material duro no es plástico y la plasticidad es esencialmente el mecanismo de consumición de energía que genera la tenacidad.

.- Una alta dureza puede ser el factor desencadenante de Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).Un caso particular de HIC tiene lugar en presencia de H_2S (Ácido sulfhídrico) que suele estar presente en la industria del Gas y Petróleo. En este caso se recomienda Revenir al acero (generalmente al C), a una temperatura de aproximadamente 600°C durante 1 hora o cualquier otro ciclo de TTPS subcrítico para obtener una dureza no superior a los HRC 22. (NACE RM 0175). Este ablandamiento se considera imprescindible para materiales con una resistencia superior a los X70.

.- Una tercera razón para realizar TTPS de ablandamiento o revenido es que la dureza también puede ser el factor desencadenante de SCC (corrosión bajo Tensión). En este caso se busca que la dureza no sea superior a los HB 200-240, estos valores están especificados para cada acero en particular por ejemplo en ASME B31.3.Las normas DIN también dan valores de dureza dentro de ese rango, aunque suelen ser mas conservativos (HB 200)
Este TTPS se suele realizar en aceros aleados al CrMo (P5, P9, P91 etc.), estos aceros por estar aleados con Cr, son más difíciles de "ablandar" o revenir, ya que justamente son aceros resistentes a las altas temperaturas. Por lo tanto para ablandarlos es necesario utilizar temperaturas superiores (720°C-760°C) a la de los aceros al Carbono. El ablandamiento o revenido es función tanto de la Temperatura como del tiempo, o sea a mayor tiempo mayor será el ablandamiento a una temperatura dada.
Conviene tener en cuenta que estos aceros al CrMo tienen una temperatura de cambio alotrópico mas alta que la de los aceros al Carbono, esto es conveniente ya que podemos alcanzar temperaturas mayores sin dejar de estar haciendo un Tratamiento Térmico Subcrítico*.

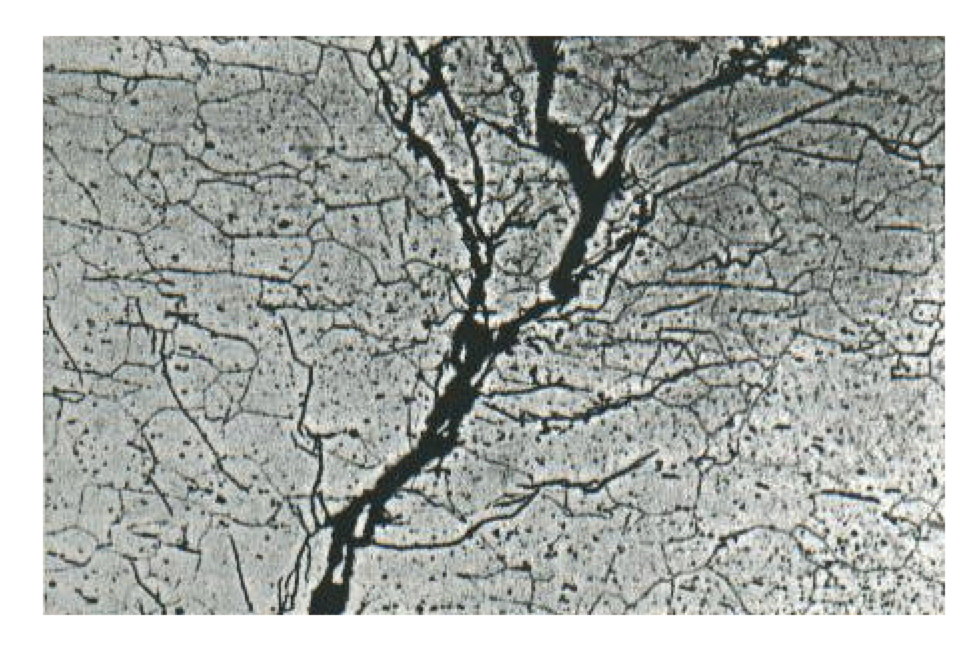


Fig.29 Corrosión Bajo Tensión (SCC) en un acero Austenítico

9.3 TTPS. MATERIALES

9.3.1 ACEROS

Desde el punto de vista de la Soldadura conviene dividir a los aceros en cuatro grupos:

I. Aceros al C o al C-Mn
II. Aceros de baja aleación (HSLA Steel)
III. Aceros de alta aleación (Refractarios, resistentes al Creep, a la Corrosión a Altas Temperaturas y a la penetración de H)
IV. Aceros inoxidables

I. .En los Aceros al C o C-Mn los efectos indeseables de la Soldadura son los que ya comentamos y debemos esperar TR, Distorsión, SCC, HIC y prevenirlos con PC o TTPS.

II. Los Aceros de baja aleación son más complejos que los Aceros al C o C-Mn debido a que aquellos se proveen en el estado templado y revenido o normalizado y revenido.
Si es necesario realizar un TTPS se debe elegir este para que no disminuya o destruya las propiedades originales. Muchas veces por razones económicas se realiza la fabricación en estado normalizado y el revenido se combina con el TTPS. Este tratamiento, como dijimos debe seleccionarse con especial cuidado por los efectos metalúrgicos que producirá.
Las precauciones que debíamos tomar para los Aceros al C o C-Mn son igualmente importantes en estos Aceros con el agregado de los posibles efectos del TTPS en la tenacidad a la fractura.
Por lo anterior se recomienda realizar ensayos de fractura de probetas entalladas en la ZAC.

III. Los Aceros del grupo III consiguen todas esa propiedades (al mismo tiempo) debido al principalmente al Cr. Este elemento de aleación tiene un problema, que es la Fragilidad de Revenido o fragilidad Krupp.
Cuando aceros al C o aleados al Cr o Cr-Ni son enfriados lentamente después de un revenido por encima de 575°C o son revenidos por tiempos largos entre 375°C y 575°C se produce una perdida de Tenacidad que se manifiesta en una reducción de los valores del Ensayo de Choque (Charpy) comparado con un revenido a velocidades rápidas en ese intervalo de temperaturas. Velocidades rápidas significa 150°C –200°C, debiéndose evitarse velocidades inferiores a 50ºC/h.
La causa de este tipo de fragilidad se cree que se debe a la precipitación de compuestos con trazas de elementos tales como Antimonio, Arsénico, estaño, y fósforo junto con Cr y/o Mn. La naturaleza intergranular de la fractura sugiere que la fragilizacion ocurre en el ex borde de grano Austenítico.
Este fenómeno puede ser revertido con un calentamiento por 30 / 45 min. del material fragilizado a una temperatura de alrededor de 575°C /600°C con un posterior enfriamiento rápido en el rango mencionado, pero el remedio mas efectivo para este tipo de Fragilidad es la adición de Mo en porcentajes de 0,15 a 0,5 %, si un acero tiene Mo en estas cantidades es mucho menos susceptible a la Fragilidad Krupp, y esta solo puede tener lugar si las velocidades de enfriamiento son extremadamente bajas (menores que 25 °C / h).por esta razón ciclos de T.T.P.S con velocidades de enfriamiento de 200°C/h o mayores no sufrirán fragilidad de revenido o Fragilidad Krupp.

IV. Los aceros Inoxidables Austeniticos pueden tener algunos problemas que requieran TTPS y a su vez estos TTPS pueden generar otros problemas especialmente una disminución de su resistencia a la corrosión, debido a ello muchas veces se prefiere no realizar TTPS. Más aun ASME no lo prohíbe ni lo recomienda, dejando a las especificaciones de Ingeniería la decisión.
Estabilidad durante el mecanizado:
A causa del mayor coeficiente de dilatación de los Aceros Austeniticos comparados con los Ferriticos la distorsión es mayor en la Soldadura de estos Aceros. Si luego de la Soldadura se requiriera un mecanizado con estrictas tolerancias, luego de la Soldadura y antes del mecanizado puede requerirse un TTPS de Distensionado. Para un Distensionado total el TTPS requerido debería realizarse a temperaturas superiores a los 800°C.

Fisuración por Recalentamiento:

Esta Fisuración puede ocurrir en ciertos Aceros Inoxidables Austeniticos. (Ver PC). Tiene lugar si soldaduras restringidas en su dilatación en aceros susceptibles son calentadas por ejemplo a temperaturas de 850°C por cortos periodos (< a 1 hora), o a menores temperaturas (≅500°C) por periodos mayores (≅1000 h).
Este tipo de fisuración aumenta con el embridamiento y con el espesor.
Todos los aceros inoxidables sufren este problema excepto el tipo 316 con contenidos de Niobio< 0,1 %. El problema puede prevenirse calentando hasta los 950°C – 1050°C y enfriando rápidamente en el rango de temperaturas de precipitación del Carburo de Cr (≅ 500°C – 800°C).

Corrosión bajo Tensión. SCC:

La presencia de Tensiones Residuales aumenta el riesgo de SCC en soldaduras Austeniticas en ciertos medios. Los aceros inoxidables Austeníticos sufren de SCC transgranular en presencia de Cloruros o medios alcalinos (Hidróxidos).
La concentración de iones cloruro necesaria para producir SCC es tan baja como unas pocas partes por millón mientras que los hidróxidos deben tener concentraciones del orden de 40%. Esta forma de fisuración ocurre solo en presencia de tensiones de Tracción, de tal manera que si reducimos el nivel de Tensiones Residuales con un TTPS de Distensionado se disminuye la susceptibilidad a la fisuración.

Corrosión y Fisuración por Corrosión:

Una forma alternativa de Corrosión y/o Fisuración Intergranular por Corrosión en medios moderadamente oxidantes es cuando ocurre Corrosión Intergranular (Weld Decay), por precipitación de carburo de Cromo $(FeCr)_{23}C_6$ en borde de grano en el rango de temperaturas de 550/ 800 °C. Un acero en este estado se dice que esta sensitizado. El problema se evita con un Tratamiento a 950°C / 1050°C para redisolver los carburos con posterior enfriamiento rápido. En el caso de un Tratamiento Localizado se presentan el mismo problema en la zona de transición entre el metal frío y el metal caliente (zona de metal a 550°C / 850 °C).
Otra forma de evitar la Corrosión Intergranular es mediante la utilización de aceros Estabilizados con Titanio (en el Tipo 321) o el Niobio (llamado Columbio en EEUU) en el acero tipo 347.
En estos aceros (321 y 347) un Tratamiento convencional de Solubilizado a 950°C / 1050°C con posterior enfriamiento rápido puede ser perjudicial, produciendo lo que se llama "Knife line Attack" –KLA-un tipo de corrosión paralelo al cordón de Soldadura, mucho mas cercano que la zona de Corrosión intergranular y mucho mas fina, tanto que se asemeja a un corte hecho por el filo de un cuchillo, de ahí su nombre Knife = cuchillo y line = línea. Este tipo de corrosión necesita de un medio oxidante tal como ácido nítrico hirviente y no ocurre si el %C< 0,03. Se puede prevenir con un TTPS a 950°C con enfriamiento LENTO en el rango de formación de carburo de Nb o Ti. El -KLA- puede evitarse simplemente calentando a la zona afectada a una temperatura superior a 815ºC a partir de la cual los carburos de Cr comienzan a redisolverse e inferior a 1050ºC donde la redisolución es casi completa, y luego enfriar lentamente. En general cuando el Tratamiento Térmico Post Soldadura (TTPS) es localizado se realiza a unos 900ºC, máxima temperatura que se puede alcanzar con los calefactores eléctricos normalmente utilizados en TTPS.
En Soldadura solo se utilizan los aceros Estabilizados al Nb ya que el Ti se volatiliza debido a las altas temperaturas del arco eléctrico.

Fragilizacion por precipitación de Fase Sigma:

Durante periodos largos, ya sea en servicio a altas temperaturas (600°C-900°C) o durante Tratamiento Térmico en ese rango de temperaturas, aceros inoxidables Austeníticos con un alto equivalente en Cr (>22%, ver diagrama de Schaeffler) o, cantidades importantes de Ferrita delta (12 a 14 %) suelen precipitar el íntermetálico fase Sigma que reduce la ductilidad de manera importante. La fase sigma tiene una composición química de 45% de Cr y 55% de Fe. A 730°C la Ferrita delta se transforma en Fase sigma rápidamente (6h) mientras que a 600°C comienza a las 1000h. Una vez formada la fase sigma solo puede ser redisuelta a temperaturas superiores a los 1000°C. Debido a la precipitación de la fase sigma el contenido de Ferrita delta de las soldaduras de aceros inoxidables que tendrán servicios a altas temperaturas o serán Tratados térmicamente se limita a un máximo de 12%-15%.

La fase sigma no esta presente en la ZAC o Metal de Soldadura sino luego de exposiciones a alta temperatura. No es probable que precipite durante el TTPS debido a los cortos tiempos de permanencia, y tiene poco efecto en las propiedades a alta temperatura pero puede causar fragilizacion cuando la soldadura se enfría desde la temperatura de servicio a temperatura ambiente.
En materiales Austeniticos al Cr-Ni (25-20 o 18-37) fundidos y con alto Carbono (0,4% C) se presenta otro problema que tiene lugar a altas temperaturas de servicio (500°C-850°C).
En estos materiales y en esas condiciones se precipitan carburos para tiempos menores a 1hora, que hace al material frágil desde temperatura ambiente hasta 750°C. Con %C de 0,1% el problema se hace menos severo y un Tratamiento de disolución de carburos a 1200°C puede ser la solución, pero debe recordarse que una exposición a temperaturas de 500°C-850°C producirá una reprecipitación. Los materiales forjados de composición similar (Cr-Ni) tienen generalmente un bajo nivel de %C, y debido a ello este problema no ocurre. Las siguientes tablas nos resume lo anterior:

Tipo de Acero Inoxidable	Problemas que requieren Tratamiento Térmico				
	Estabilidad durante el Mecanizado	Fisuración por Recalentamiento	SCC		Weld Decay o Corr.Intergranular
			transgranular	intergranular	
304 (18/8)	Si	Si	Si	Si	Si C > 0,06 %
316(18/8/3Mo)	Si	Si Nb>0,1%	Si	No	No
321(18/8/1Ti)	Si	Si	Si	No	No
347(18/8/1Nb)	Si	Si	Si	No	No
309(25/12)	Si	Si	Si	Si	No
310(25/20)	Si	Si	Si	Si	No
18/37(cast)	Si	No	No	Si	N/A
Acción a Tomar	TT a >800/850°C	TT a 950 / 1050°C	TT>800/850°C Relevamiento de TR		TT a 950/1050°C

Tipo de Acero Inoxidable	Problemas que resultan del Tratamiento Térmico			
	Precipitación de fase Sigma		Se reduce la resistencia a la Corrosión	Knife line Attack
	Durante el TT	En Servicio		
304 (18/8)	No	Tiempo>10h	Si (1)	No (2)
316(18/8/3Mo)	No	Tiempo>10h	Si	No
321(18/8/1Ti)	No	Tiempo>10h	Si	Si
347(18/8/1Nb)	No	Tiempo>10h	Si	Si
309(25/12)	No	Tiempo>1000h	Si	No
310(25/20)	No	Tiempo>1000h	Si	No
18/37(cast)	No	Tiempo>1000h	N/A	No
		Ocurre en el rango de temperaturas entre 650°C/850°C	Ocurre luego de Tratamientos Térmicos a 500°C/800°C por mas de 1 hora	Ocurre luego de Tratamientos Térmicos entre 550°C /750°C por mas de 1 hora

(1)**Si**, significa que el problema ocurrirá bajo las condiciones detalladas en el texto y que la Acción a tomar debe ser tomada para evitar el problema. Si la acción no puede ser tomada por inconveniente se debe tener conciencia que las propiedades del material están disminuidas y si eso es aceptable o no para las condiciones de Servicio
(2)**No**, significa que el problema no ocurre en condiciones normales pero conviene saber que puede haber excepciones y si nuestra condición de Servicio lo es o no.

9.3.2 SOLDADURAS DISÍMILES (AUSTENITA – FERRITA)

El coeficiente de expansión térmica de los aceros Ferriticos y Austeniticos es diferente. Esto significa que cuando se calienta una junta entre estos dos tipos de material se producirán tensiones Térmicas debido a la mayor expansión del material austenítico. Si se elige una temperatura para que el acero Ferritico quede sin tensiones residuales es posible que queden Tensiones Residuales en el acero Austenítico a esta Temperatura. Durante el enfriamiento el acero Austenítico se contraerá mas que el Ferritico y luego, ala Temperatura ambiente habrá Tensiones Residuales en ambos componentes. Si el TTPS se requiere para Revenir el acero Ferritico, debe elegirse la Temperatura cuidadosamente para no degradar las propiedades inoxidables del acero Austenítico.
Lo anterior se aplica en aceros Ferriticos revestidos con "cladd" de acero inoxidable. En estos casos es inevitable que queden Tensiones Residuales en la interfase Austenita / Ferrita.

9.3.3 ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de Aluminio pueden dividirse en No Tratables Térmicamente y aquellas que desarrollan sus propiedades optimas con un Tratamiento de Precipitación o Envejecido.
Si se requiere un Distensionado en el primer grupo, no es necesario tratar térmicamente después, pero en el seguido grupo se hace necesario un Tratamiento de Solubilizacion y posterior Envejecido para recuperar las propiedades perdidas durante el Distensionado.
Las temperaturas de Distensionado para Aleaciones de Aluminio es usualmente 350ªC.
Para las Aleaciones envejecibles se necesita Solubilizar a 450ªC /550 ºC y el envejecido a alrededor de 120ªC -180ªC. Las temperaturas y tiempos son dependientes del tipo de Aleación y los valores exactos deben solicitarse al fabricante del material. Tratamientos de Envejecido son necesarios además para dar estabilidad metalúrgica al material ya que puede producirse envejecimiento natural a temperatura Ambiente si no se realiza un envejecido artificial.

9.3.4 ALEACIONES DE COBRE

En cobre puro no es necesario realizar TTPS. Alguna Aleaciones de Cobre con bajos contenidos de aleación puede requerirse un Tratamiento de envejecido post Soldadura para desarrollar adecuadas propiedades en la ZAC. En bronces fosforosos con 8% de Estaño pueden precipitar compuestos fragilizantes en el metal de soldadura, debido a la formación Metaestable de los mismos por enfriamiento rápido , en este caso una homogeneización a 600ºC redisolverá estos compuestos.
Los bronces al Aluminio, latones y "Gun-Metal" sin plomo pueden sufrir SCC en agua de mar. Es necesario un Tratamiento a 700ºC durante 3horas para Bronces al aluminio a / ß con Níquel. En los bronces al Aluminio el TT no es generalmente adecuado para evitar problemas de SCC en vapores de Amoníaco, el problema se resuelve cambiando la composición química de la aleación.
Para latones, la temperatura de Tratamiento mas adecuado para evitar SCC (season cracking) es 250ºC al igual que en Gun-Metal libre de Plomo.
Las aleaciones Cobre-Níquel no requieren TTPS.

9.4 CICLO TERMICO Y ANCHO DE BANDA DE CALENTAMIENTO

Las cuatro variables del ciclo térmico a controlar en el TTPS son:
1) La velocidad de Calentamiento a partir de cierta Temperatura Especifica
2) La Temperatura de TTPS o Temperatura de Mantenimiento
3) El Tiempo a la Temperatura de Mantenimiento
4) La Velocidad de Enfriamiento hasta cierta Temperatura Específica

Estas variables pueden ser fijadas por los Códigos, Especificaciones o Procedimientos.
Algunos Códigos limitan las velocidades de calentamiento y enfriamiento con el objeto de prevenir las tensiones térmicas producidas por las contracciones y/o dilataciones no homogéneas. Los gradientes de Temperatura a través del espesor y en dirección longitudinal producen Tensiones Térmicas.
No hay manera de eliminar tales diferencias de Temperatura debidas al TTPS localizado, sin importar cuan lentas sean las velocidades de calentamiento o enfriamiento o cuan largo sea el tiempo de mantenimiento.
Siempre que el calor sea aplicado de un solo lado del espesor, siempre habrá un gradiente térmico a través del mismo, y cuando mayor sea el espesor mayor será este gradiente térmico para un dado aporte calórico.
La experiencia ha mostrado que el gradiente de Temperatura en el espesor es inversamente proporcional al ancho de banda de calentamiento en la superficie sin importar el diámetro, espesor o tipo de fuente calórica empleada.
En general, el ancho de la banda circunferencial a ser calentada a la Temperatura de Mantenimiento debe ser como mínimo cinco veces el espesor mayor (5t) de la junta soldada.
Para soldadura de conexiones a envolvente el ancho de banda debe incrementarse en la mayor dimensión (diámetro en cañería, o la dimensión del alma en un perfil normalizado) de la conexión. En estos casos hay diferencias entre cada código, por lo tanto se debe consultar el documento especifico.

Por ejemplo, con un espesor de 3” (76mm) el ancho cubierto por resistencias, espiras de inducción, calefactores radiantes o cualquier otro método de Calefaccionado debe ser como mínimo 5x76mm = 380 mm con el objeto de mantener el gradiente Térmico en el espesor a un nivel aceptable.

Aun con un ancho de banda de 5t y una adecuada aislacion, el gradiente en el espesor puede ser significativo. Algunas experiencias han mostrado que para espesores importantes, entre 3” (76mm) y 4,5” (114mm) la diferencia puede alcanzar los 30°C y 40°C respectivamente. En estos casos se permite cierta tolerancia y la temperatura en el exterior (lado más caliente) debe mantenerse cerca del valor máximo de temperatura permitido por el procedimiento. Esto previene que la superficie interior este demasiado fría.

Durante todos los estadios del ciclo térmico debe mantenerse la temperatura uniforme en la circunferencia. Si hubiese zonas mas calientes, las mismas podrían distorsionarse permanentemente, fisurarse o alterar sus propiedades.

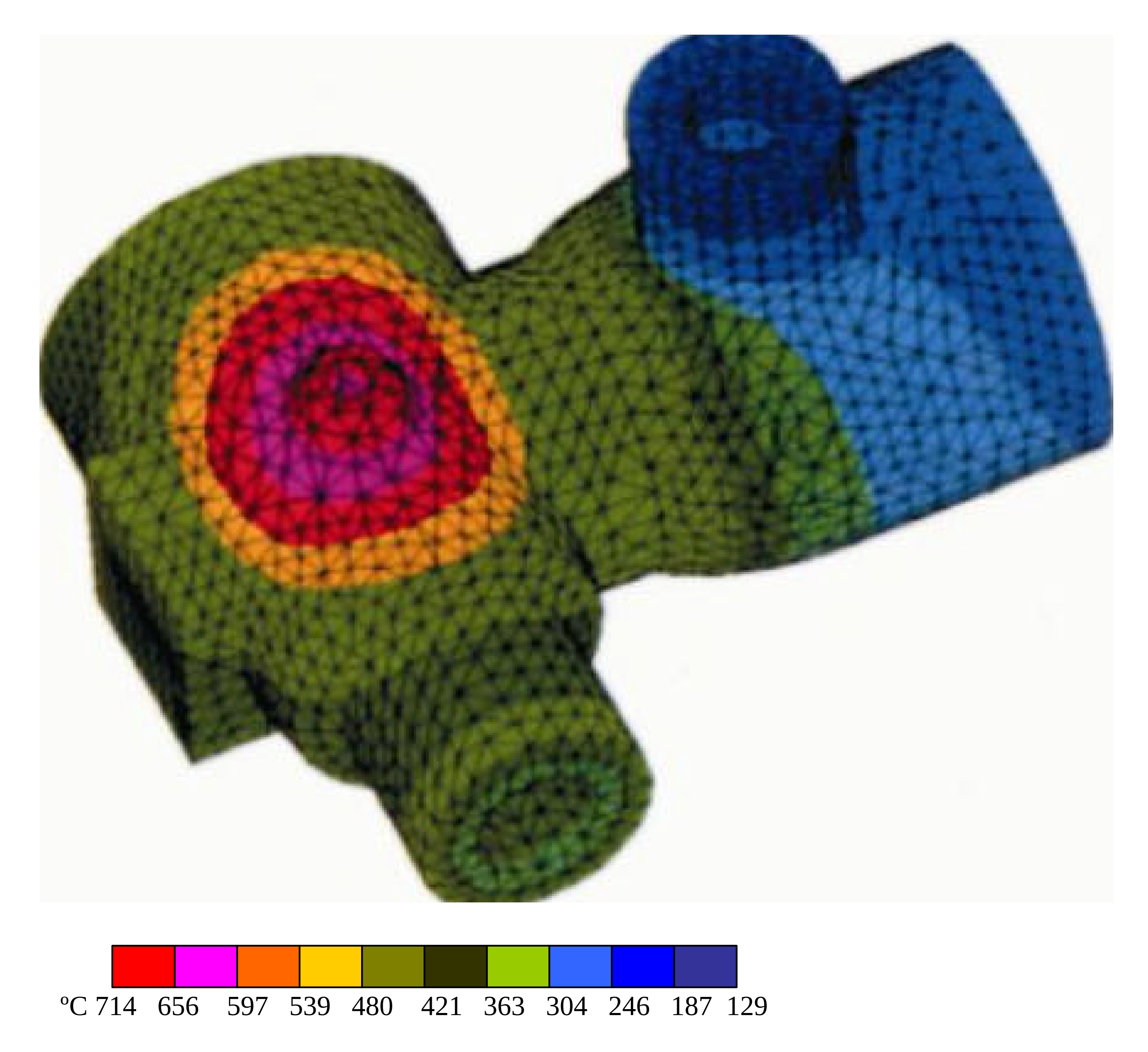


Lámina 10: Análisis por elementos Finitos de una válvula en una Central de Energía de 700MW para el TTPS del drenaje en el cuerpo de la válvula. Observe el código de colores.

9.4.1 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO

La velocidad de calentamiento influye en la diferencia de temperatura entre el diámetro interior y el exterior, que alcanza su máximo valor cuando comienza el periodo de mantenimiento. El gradiente térmico radial produce tensiones tangenciales, con las fibras exteriores en compresión y las interiores en tracción, de esta manera la superficie exterior trata de dilatarse mientras que la superficie interior mas fría se lo impide. Las tensiones son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior. A medida que la velocidad de calentamiento aumenta la diferencia de temperatura también lo hace. Sin embargo si no se producen fisuras, no se daña al material pues las TR se relevaran durante el posterior mantenimiento a la temperatura de tratamiento.

Experimentos han mostrado que el gradiente térmico radial no será excesivo, a pesar de la velocidad de calentamiento, si el ancho de la banda de calentamiento es como mínimo 5t. En todo caso si la diferencia de Temperatura entre el exterior y el interior no excede los 83°C (150°F) las tensiones tangenciales calculadas no superaran los 138 / 145 MPa (Mega Pascales, 1Kg /mm^2 = 9,8 MPa) ya sea en compresión o tracción.

Estas tensiones parecen ser aceptables para los materiales de uso normal en soldadura, por lo tanto se puede permitir cualquier velocidad que no produzca un gradiente en el espesor superior a los 83°C a menos que algún código o especificación diga lo contrario.

Valores orientativos de velocidades de calentamiento y enfriamiento pueden obtenerse de ASME VIII (UCS 56) o ASME B31.1 (132.5), en estos códigos además de indicarnos las velocidades máximas nos informa en que rango de temperatura es obligatorio, por ejemplo ASME B31.1 indica que la velocidad de calentamiento por encima de 315°C no debe ser superior a los 335°C dividido por ½ del máximo espesor del material en pulgadas, esto significa que hasta los 315°C la velocidad de calentamiento es libre. Esto no significa que podamos dar velocidades altas ya que la propia inercia del material me lo impedirá, además por el beneficio de ganar unos minutos en el calentamiento corremos el riesgo de quemar los calefactores.

9.4.2 TIEMPOS DE MANTENIMIENTO

Dijimos que el Distensionado es un proceso de relajación de tensiones por Creep (Fluencia lenta o termo fluencia). La deformación por Creep depende, a diferencia de la deformación plástica convencional, del tiempo y de la temperatura. Por lo tanto la cantidad de Distensionado (% de TR relevadas) es proporcional al tiempo de mantenimiento. Cuanto mayor sea la temperatura de mantenimiento el tiempo podrá disminuirse, de acuerdo al parámetro de Larson Miller.

A este respecto el Código ASME VIII (UCS56) y ASME B31.1 (Table 132.1) permiten, si no se alcanzo la temperatura especificada de tratamiento, compensar con un mayor tiempo a menor temperatura. Esta practica de compensar con tiempo la falta de temperatura tiene su limite y en estos códigos la máxima disminución de temperatura aceptada es de 112°C (200°F), si la falta de temperatura supera este limite hay que realizar el Tratamiento nuevamente ya que seguramente falto potencia calefactora o la aislacion era insuficiente.

Algunos procedimientos que especifican los Tiempos de Mantenimiento en termino de horas por unidad de espesor (1h / pulgada) pueden producir para grandes espesores tiempos de mantenimiento excesivos. En estos casos pueden no ser requeridos a menos que algún código lo especifique.

9.4.3 VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

Las tensiones producidas durante el calentamiento son normalmente relevadas durante el mantenimiento a temperatura de tratamiento, mientras que las producidas durante el enfriamiento tienden a permanecer. Por esta razón a veces la velocidad de enfriamiento requerida es inferior a la de calentamiento (AWS D10.10).

Sin embargo si leemos ASME VIII vemos que es a la inversa, indica 400°F/h por pulgada de espesor, para calentamiento y 500°F/h por pulgada de espesor para enfriamiento (UCS 56). En ASME B31.1 (132.5) no hace diferencia e indica la misma velocidad para el calentamiento y enfriamiento, 335°C/h dividido por ½ del espesor.

Un factor a tener en cuenta para explicar lo anterior, es que es más fácil y mas probable que nos excedamos en la velocidad de calentamiento ya que esta depende de la Temperatura (˜1000ºC) y de la potencia de los calefactores, pues con la potencia normalmente encontrada vemos que la diferencia de temperaturas entre el calefactor y la pieza durante el calentamiento es mayor que durante el enfriamiento y por lo tanto en los mismos podemos calentar rápidamente la piel del caño o recipiente mientras que el interior se encuentra aun frío, produciendo un gradiente de temperatura excesivo. Una manera obvia de evitar velocidades excesivas de enfriamiento, si no tenemos programadores de ciclo térmico, es mantener la aislacion hasta temperaturas suficientemente bajas (150°C).

Conviene tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento depende de la diferencia de temperatura entre el material y el ambiente por lo tanto a altas temperaturas la velocidad de enfriamiento será mayor que a bajas temperaturas. A altas temperaturas se deberá seguir aplicando calor para evitar velocidades excesivas, esto se hacia manualmente pero actualmente se logra automáticamente por intermedio de programadores de ciclo térmico.

9.5 PERDIDAS DE CALOR Y AISLACION

Un factor importante para lograr la temperatura de tratamiento es evitar las perdidas de calor tanto generales como localizadas. Estas generan zonas frías, productoras de tensiones térmicas que a su vez pueden crear TR.

Las perdidas de calor pueden tener lugar por conducción del mismo metal desde la zona caliente a zonas adyacentes mas frías, por conveccion del aire dentro de la cañería (efecto chimenea) o por radiación. Nada puede hacerse para evitar las perdidas de calor por conducción dentro del mismo material salvo aumentar el ancho de la banda de calentamiento. Con respecto a las fugas por conveccion o radiación tanto internas como externas la aislacion es el método idóneo. En el caso de interior de cañerías la aislacion interna es casi imposible, sobre todo en diámetros pequeños, de difícil acceso. Cuando la cañería se encuentra en forma vertical, el efecto chimenea es importante y conviene tapar los extremos de la cañería para evitarlo.

Se debe extraer todo resto de líquidos, especialmente agua, ya que si se encuentra presente en la zona de tratamiento se evaporará y luego condensara en zonas adyacentes mas frías pudiendo volver a la zona donde se encontraba por desnivel, reiniciando el ciclo de evaporación-condensación. En estos casos es imposible superar los 400°C, siendo necesario extraer el agua antes de proseguir o recomenzar el tratamiento.

Como aislante se prefiere un material refractario, de alto valor de aislacion, como la fibra cerámica, en espesores como mínimo de 1” y densidades de 8Lb/pie^3.En los casos de aislacion de grandes estructuras, por una razón de costo puede utilizarse fibra cerámica solo sobre la superficie caliente (min.1/2”) y las capas exteriores de otro aislante menos costoso como la lana mineral, este material no es tan refractario (resistente a las altas temperaturas) como la fibra cerámica pues no resiste estar en contacto con materiales a temperaturas mayores a los 650°C. Cuando se usa lana mineral para aislar grandes estructuras como tanque esféricos de gas conviene que sea “armada” con alambre tejido y revestida con polietileno para evitar que se desarme durante la manipulación o moje y absorba agua de lluvia. Como regla práctica se acostumbra a aislar una zona de dos a tres veces el ancho de banda de calentamiento (dependiendo del espesor).

No conviene usar aislacion de fibra de vidrio en vez de lana mineral pues la primera tiene un aglomerante polimérico que es combustible y en contacto, aunque sea solo por accidente, entra en combustión (ver TTPS de esferas). El “amianto” o asbestos esta contraindicado por razones de salud y si bien la fibra cerámica puede producir irritación en la piel es ampliamente aceptada hoy en día. Existe un material mas seguro desde el punto de vista de la salud, llamado Soluble Amorphous Wool Product (Termal Ceramics Inc.) que tiene la cualidad, a diferencia de la fibra cerámica, de disolverse en las mucosas del sistema respiratorio desapareciendo como cuerpo extraño en pocas horas. Todavía (2003) en Argentina no se comercializa y en Europa recién se esta empezando a utilizar. Su costo es sustancialmente mas elevado.

9.5.1 MONTAJE DE LA AISLACION

La aislacion de fibra cerámica se corta en obra con “cutters” a medida de la parte a ser aislada, teniendo en cuenta los solapes necesarios para evitar fugas de calor por las uniones entre distintas trozos de aislación. La aislacion debe fijarse firmemente sobre los calefactores (calentamiento por resistencias) o sobre el material caliente por medio de sunchos de acero (recipientes grandes) o alambre en cañería de menor diámetro. Si la temperatura es superior a los 650°C se deben colocar capas adicionales de aislacion, y si hubiese efecto chimenea se deben tapar los extremos de la cañería con tapones de fibra cerámica. En calentamiento por inducción la aislacion se coloca entre el material y las espiras, con el objeto de proteger a las mismas de la temperatura del la cañería.

9.6 SOPORTACION DE LA CAÑERÍA DURANTE EL CALENTAMIENTO

Cuando un metal se encuentra a alta temperatura, su resistencia es menor que a temperatura ambiente. Solo el peso propio de la zona del material entre apoyos o en voladizo puede ser suficiente para producir deformaciones permanentes a la temperatura de Tratamiento Térmico. Debido a ello se debe soportar la cañería o estructura convenientemente para evitarlo. Si se utiliza el efecto “Cold spring” y es necesario realizar TTPS en nuestra estructura, para evitar perdida de “cold spring” los TTPS en la zona tensionada elásticamente deben ser realizados antes de realizar la ultima soldadura. Además la cañería debe ser soportada todo el tiempo durante la soldadura y el TTPS. (Cold Spring comprende el acortamiento de la cañería durante el montaje para compensar las dilataciones en servicio a alta temperatura)

10. SEGURIDAD

Los peligros potenciales durante la realización de los Tratamientos Térmicos son la Tensión Eléctrica y la alta Temperatura que puede producir quemaduras si la aislacion no es apropiada, o si la eventual manipulación durante el periodo de alta temperatura se realiza sin precaución o protección (guantes aislantes).

Si se utiliza el método de la Mampara con calefactores Four-Bank, las tensiones son de 380V a diferencia de las tensiones de 85V utilizadas en los calefactores flexibles.

Cuando se utilizan maquinas de soldar como fuentes de energía para TTPS o cilindros de acetileno o gas para el precalentamiento puede consultarse ANSI/ASC Z49.1, Safety in Welding and Cutting.
A continuación y en función del tipo de trabajo se evalúan los riesgos potenciales y las acciones de seguridad tomadas con el objeto de eliminarlos o minimizarlos.

DESCRIPCION DEL TRABAJO	RIESGO	PROTECCION
AMOLADO Y COLOCACION DE TC	CHISPAS PROYECCION DE VIRUTA	• ANTEOJOS DE SEGURIDAD • ANTIPARRAS • GUANTES
	CONECCION 380/220 V	• DISYUNTOR DIFERENCIAL
FIJACION DE CALEFACTORES	ALTURA	• ANDAMIOS • CINTURON DE SEGURIDAD
	OTRO TRATAMIENTO CERCA	• GUANTES
AISLACION	FIBRA CERAMICA EN EL AIRE	• MASCARILLA ANTIPOLVO ANTEOJOS DE SEGURIDAD
CONEXION DE CALEFACTORES (BAJA TENSION, 85 V.)	QUEMADO DE CABLES CHISPAS	• ALEJAR CABLES DE FUENTE DE CALOR. • SUJETAR CABLES A PUNTOS FIJOS • CONECCIONES ELECTRICAS FIRMES • PROTECCION MECANICA DE CABLES
CONEXION DE EQUIPOS ALTA TENSION (380/220 V)	CHOQUE ELECTRICO	• CARTEL DE ADVERTENCIA EN CABLES Y EQUIPOS • SECCION DE CABLES ADECUADA • CONECCION ADECUADA • PROTECCION CONTRA HUMEDAD • FUSIBLES ADECUADOS
DURANTE EJECUCION DE T.T.P.S.	TEMPERATURA	• VALLADOS • GUANTES
DESARMADO DE T.T.P.S.	FIBRA EN EL AIRE	• MASCARILLA ANTIPOLVO ANTEOJOS DE SEGURIDA
	ALTURA	• VALLADO. • CINTURON DE SEGURIDAD • ASCENSO Y DESCENSO DEMATERIALES CON SOGA(NO ARROJAR)

11. CONCLUSIÓN

Es cada día mayor la necesidad de utilizar en la fabricación de estructuras soldadas aceros de alta resistencia con el objeto de disminuir espesores y consecuentemente pesos y costos.

Esto ha llevado a la utilización de aceros aleados que si bien nos proporcionan altas resistencias mecánicas, lo hacen a costa de una disminución de la soldabilidad.

En forma paralela se modifica el criterio de evaluación de la calidad de la “junta soldada sin defectos” en un criterio mas realista de “junta soldada con defectos aceptables”

De esta manera se reconoce tanto la limitación práctica para obtener juntas perfectas como el factor económico en la construcción.

Este nuevo criterio impone a la Ingeniería moderna la reducción del margen de Incertidumbre debido al desconocimiento de la distribución real de Tensiones, debido fundamentalmente a la existencia de Tensiones Residuales, además de otros factores inherentes al material, como desviaciones en el proceso de fabricación y de control de calidad, grado de exactitud de la técnica de END utilizada, instrumentos utilizados ,subjetividad del operador y por ultimo variaciones en las condiciones de Servicio.

Con todo lo que puede salir mal durante la fabricación y utilización en servicio de una soldadura, un juicioso uso de los Tratamiento Térmicos puede influir más que cualquier otro factor en la obtención del éxito.

Sergio G. Laufgang

21 / 04 / 2004